

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra elektroenergetiky

Synchronní stroj s permanentním magnetem

Permanent Magnet Synchronous Machine

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Ondřej Portužák**
Studijní program: B2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907R001 Elektroenergetika
Téma: **Synchronní stroj s permanentním magnetem**
Permanent Magnet Synchronous Machine

Zásady pro vypracování:

- 1) Použití permanentních magnetů v elektrických strojích
- 2) Teorie synchronního stroje s permanentním magnetem
- 3) Měření na synchronním stroji s permanentním magnetem
- 4) Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

- 1) Hrabovcová, V. a kol.- Moderné elektrické stroje, Žilinská univerzita EDIS 2001
- 2) Gieras, J.- Permanent Magnet Motor Technology: Design and Applications
- 3) Hrabovcová, V. a kol.- Meranie a modelovanie elektrických strojov, Žilina
- 4) Chmelík, K.- Asynchronní a synchronní elektrické stroje, VŠB-TU Ostrava 2002

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Václav Čech, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2014

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

PROHLÁŠENÍ

„Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.“

V Ostravě dne 7. května 2015

Portuza

.....

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce, panu Ing. Václavu Čechovi, Ph.D. Děkuji mu za jeho odborné vedení, udělení cenných rad a připomínek, které pro mne byly velkým přínosem při samotném zpracování práce a v neposlední řadě jeho pomoc při měření v laboratoři.

ABSTRAKT

Tato práce je zaměřena na popis problematiky synchronního stroje s permanentním magnetem. Je rozdělena na práci teoretickou a část praktickou. Teoretická část se lehce dotýká zásadních historických milníků v oblasti magnetismu a teorií magnetismu obecně. Větší důraz pak klade na magnetické materiály, použité převážně v permanentních magnetech, jejich dělení, vlastnosti a aplikace, zejména pak v oblasti elektrických strojů. Dále zahrnuje teoretický rozbor synchronních strojů s permanentním magnetem, popis jejich obecných vlastností a teorii měření. Praktická část obsahuje měření na synchronním stroji s PM a tím ověření teoretických předpokladů.

KLÍČOVÁ SLOVA

magnetismus, magnetické materiály, hysterezní smyčka, koercitivita, remanence, permanentní magnety, SmCo, NdFeB, elektrické stroje, PMSM

ABSTRACT

This bachelor thesis is focused to the permanent magnet synchronous machine problematic description. It is divided to theoretical and practical parts. The theoretical part touches an essential historical milestone in the magnetism area and the magnetism theory in general. A greater emphasis is given to the magnetic materials used predominantly in permanent magnets, their classification, properties and applications, especially in the field of electrical machines. Further it includes the theoretical analysis of permanent magnet synchronous machines, description of their general attributes and measurement theory. The practical part contains measurement of the permanent magnet synchronous machine and thus verification of theoretical assumptions.

KEY WORDS

magnetism, magnetic materials, hysteresis loop, coercivity, remanence, permanent magnets, SmCo, NdFeB, electric machines, PMSM

SEZNAM NĚKTERÝCH POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZNAČEK

<i>Symbol</i>	<i>název</i>	<i>jednotka</i>
A	Měrné proudové zatížení povrchu kotvy	(–)
B	Indukce magnetického pole	(T)
B_0	Magnetická indukce ve vakuu	(T)
B_s	Maximální hodnota magnetické indukce	(T)
B_r	Remanentní magnetická indukce	(T)
B_δ	Magnetická indukce ve vzduchové mezeře	(T)
BH	Energetický součin magnetu	(kJ · m ⁻³)
$(BH)_{\max}$	Maximální energetický součin	(kJ · m ⁻³)
$\cos \varphi$	Účinník	(–)
d	Průměr kotvy	(m)
dS	Plošný element	(m ²)
EM	Elektrický motor	(–)
ES	Elektrický stroj	(–)
Fe_3O_4	Magnetit	(–)
F_m	Budící magnetické napětí	(A)
f	Frekvence	(Hz)
H	Intenzita magnetického pole	(A · m ⁻¹)
H_0	Intenzita magnetického pole ve vakuu	(A · m ⁻¹)
H_c	Koercitivní intenzita magnetického pole	(A · m ⁻¹)
H_d	Demagnetizační pole	(A · m ⁻¹)
H_s	Maximální hodnota intenzity magnetického pole	(A · m ⁻¹)
H_δ	Intenzita magnetického pole ve vzduchové mezeře	(A · m ⁻¹)
I	Proud	(A)
I_b	Budící proud	(A)
I_l	Proud statoru	(A)
J	Magnetická polarizace	(T)
J_{\max}	Maximální magnetická polarizace	(T)
$J_{\max\text{Fe}}$	Maximální magnetická polarizace železa	(T)
k_c	Carterův činitel	(–)
k_d	Demagnetizační faktor	(–)
k_p	Koeficient permanence	(–)
l_{Fe}	Délka kotvy	(m)
l_m	Délka magnetu	(m)
MMF	Magneticky měkké ferity	(–)
MTF	Magneticky tvrdé ferity	(–)
M	Vektor magnetizace	(A · m ²)
m	Výsledný magnetický moment	(A · m ²)
m_{orb}	Dráhový magnetický moment	(A · m ²)
m_{spin}	Spinový magnetický moment	(A · m ²)
n	Rychlost otáčení	(ot · min ⁻¹)
n_s	Synchronní otáčky	(ot · min ⁻¹)
PM	Permanentní magnet	(–)

PMSM	Synchronní stroj s permanentním magnetem	(–)
P_i	Vnitřní výkon stroje	(W)
P_1	Jednotlivé výkony stroje	(W)
q	Elementární náboj	(C)
R	Kovy vzácných zemin	(–)
SS	Synchronní stroj	(–)
S_M	Plocha magnetu	(m ²)
S_δ	Plocha vzduchové mezery	(m ²)
TM	Přechodové kovy	(–)
T_a	Časová konstanta stejnosměrné složky	(s)
T_c	Curieův bod	(°C)
T_{cFe}	Curieho teplota pro železo	(°C)
T_{cNi}	Curieho teplota pro nikl	(°C)
T'_d	Časová konstanta pro X'_d	(s)
T''_d	Časová konstanta pro X''_d	(s)
U	Napětí	(V)
U_i	Svorkové napětí	(V)
U_{ib}	Napětí indukované buzením	(V)
U_s	Sdružené napětí	(V)
V_M	Objem magnetu	(m ³)
V_δ	Objem ve vzduchové mezeře	(m ³)
$W_{\delta max}$	Maximální potenciální energie magnetického pole v okolí magnetu	
X_d	Podélná reaktance	(Ω)
X'_d	Rázová reaktance v podélné ose	(Ω)
X''_d	Přechodná reaktance v podélné ose	(Ω)
X_q	Příčná reaktance	(Ω)
X'_q	Rázová reaktance v příčné ose	(Ω)
X''_q	Přechodná reaktance v příčné ose	(Ω)
ΔV	Objem	(m ³)
δ	Vzduchová mezera	(–)
ϑ	Zátěžný úhel	(φ)
μ_0	Permeabilita vakua	(H · m ^{–1})
μ_1	Počáteční permeabilita	(H · m ^{–1})
μ_{max}	Maximální permeabilita	(H · m ^{–1})
μ_r	Relativní permeabilita	(H · m ^{–1})
μ_δ	Permeabilita vzduchové mezery	(H · m ^{–1})
χ	Magnetická susceptibilita	(–)
ω_s	Synchronní úhlová rychlost	(Hz)

Obsah

ÚVOD	10
1. HISTORIE MAGNETISMU	11
1.1 Starověk	11
1.2 Pierre Pélerin de Maricourt (Petrus Peregrinus) (1269?)	12
1.3 Giambattista della Porta (1535 – 1615).....	12
1.4 William Gilbert (1544 – 1603).....	12
1.5 René Descartes (1596 – 1650)	13
1.6 Elektrodynamika a magnetismus	14
2. TEORIE MAGNETISMU	15
2.1 Teorie magnetického pole	15
2.2 Feromagnetismus	16
2.3 Rozdělení materiálů podle chování v magnetickém poli	19
2.4 Feromagnetické materiály, Feromagnetismus.....	20
2.4.1 Maximální magnetizace feromagnetických materiálů	23
2.4.2 Vliv teploty na feromagnetický materiál.....	24
2.5 Permanentní magnetismus	25
2.6 Rozdělení magnetických materiálů	25
2.6.1 Magneticky měkké materiály	25
2.6.2 Magneticky tvrdé materiály	26
2.7 Stabilizace PM (Pracovní bod).....	31
2.8 Maximální energetický součin $(BH)_{\max}$	33
3. MATERIÁLY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ, JEJICH VLASTNOSTI A POUŽITÍ. 35	
3.1 Materiály permanentních magnetů na bázi slitin	35
3.2 Feritové materiály permanentních magnetů.....	37
3.2.1 Výroba magneticky tvrdých feritů	37
3.3 Materiály PM ze vzácných zemin	39
3.3.1 Vývoj PM ze vzácných zemin.....	39
3.3.2 Permanentní magnety na bázi samarium – kobalt.....	40
3.3.3 Permanentní magnety na bázi neodym – železo – bor	41
3.3.4 Vlastnosti a význam PM ze vzácných zemin	42
3.4 Magnetizování PM	43
3.5 Použití PM.....	46

3.6.	Použití PM v elektrických strojích.....	47
4.	SYNCHRONNÍ STROJE	49
4.1.	Použití synchronních strojů.....	49
4.2.	Konstrukce synchronních strojů.....	49
4.3.	Charakteristika naprázdno.....	51
4.4.	Charakteristika nakrátko	52
4.5.	Paralelní chod generátoru s tvrdou sítí.....	52
4.6.	Fázování generátoru se sítí.....	53
4.7.	Náhlé zkraty na synchronním generátoru.....	53
4.8.	Synchronní stroje s permanentními magnety	55
4.8.1.	Válcové motory	55
4.8.2.	Diskové motory	58
5.	MĚŘENÍ NA SYNCHRONNÍM STROJI S PERMANENTNÍM MAGNETEM	62
5.1.	Měření naprázdno.....	62
5.2.	Měření nakrátko	64
5.3.	Měření V-křivek.....	66
5.4.	Měření přifázování	68
5.5.	Měření náhlých zkratů.....	69
	ZÁVĚR	72
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	73

ÚVOD

Synchronní stroje byly tradičně používány s vnějším buzením cívkami, napájenými z cizího zdroje. S rozvojem frekvenčního řízení synchronních motorů se začala snižovat nevýhoda oproti asynchronním motorům, a to regulace otáček a spolu s rozvojem nových materiálů pro permanentní magnety se objevují nové možnosti pro odstranění další možné nevýhody synchronních strojů/motorů, kterou je vyšší pořizovací cena oproti motorům asynchronním.

Předkládaná bakalářská práce si klade za cíl provést historii a teorii magnetismu se zaměřením na permanentní magnety, včetně materiálů, jejich vlastností a použití. Z hlediska synchronních strojů se pak práce zaměřila na použití permanentních magnetů v elektrických strojích.

Podstatnou částí bylo měření na synchronním stroji s permanentním magnetem, součástí bylo měření naprázdno, měření nakrátko, měření V-křivek, přifázování a měření náhlých zkratů. Cílem měření bylo ověření správnosti teoretických předpokladů porovnáním s výsledky měření.

1. HISTORIE MAGNETISMU

1.1 Starověk

Slovo magnet zřejmě pochází z řeckého „magnés“ a bývá spojováno se zeměpisným názvem „Magnésia“. Takto byla označována krajina v severovýchodní části Evropského Řecka bezprostředně související se starou Makedonií, stejný název ovšem též přísluší hned dvěma městům v nejzápadnější části Přední Asie, v Ionii resp. v Lydii. Právě v okolí posledně vzpomenutého města, Magnésia pod Sipylem (dnešní Manisa), byla bohatá naleziště vydatně zmagetizované železné rudy Fe_3O_4 , minerálu magnetovce (magnetitu), který fungoval jako přirozený magnet a byl tedy prvním zdrojem poznatků o magnetismu a magnetických silách.

Objev minerálu magnetovce (magnetit) byl patrně nezávisle na sobě učiněn nejméně ve dvou starověkých kulturách – v Řecku a v Číně. Předcházelo mu zřejmě zvládnutí přípravy železa ze železné rudy; právě v oblastech, kde se tato ruda těžila, byla i naleziště přírodního magnetitu. Kromě toho, že se kousky magnetitu vzájemně přitahovaly a odpuzovaly (přírodní magnety), přitahovaly velmi silně i železo (železné piliny). Navíc v Číně – zřejmě jako první – byl objeven kompas: natáčení těchto magnetů účinkem zemského magnetického pole a jeho využití k určování zeměpisné orientace.

Objevy magnetismu v Řecku se kladou do 1. poloviny 1. tisíciletí př. n. l. Ze zmínky v Aristotelovi víme, že se jím zabýval Thales Milétský (6. stol. př. n. l.), též, jehož jméno je spojováno i s objevem elektřiny (povrchový elektrostatický náboj na jantaru), resp. elektrostatické indukce.

Nejsouhrnnější informace: Lucretius Carus, De Rerum Natura, 1. stol. př. n. l.

Celkem lze mít za ověřené, že ve starém Řecku byla známa magnetická indukce (magnetování a přitahování železa), známa existence odpudivé síly působící mezi magnety, existence pólů magnetu však přesto, jak se zdá, známa nebyla. Magnetka ani kompas v Řecku známy nebyly.

Událostí velkého praktického významu bylo až poznání kompasu (v Evropě), patrně koncem 12. století. Podle Needhama je první zpráva o použití kompasu v Evropě z r. 1190. Použito bylo jehly zmagetizované magnetismem a spojené s plovoucí slámkou či brčkem. Po mnoho let byl kompas využíván především mořeplavci a opředen mnoha pověrami. Nicméně časem vzbudil nový zájem i o samostatný jev magnetismu a jeho nositele – magnetit → objevují se první pokusy o systematické uchopení magnetických jevů – možno je klasifikovat jako první vážné vědecké pokusy:

1.2. Pierre Pélerin de Maricourt (Petrus Peregrinus) (1269?)

Francouz, zveřejňuje práci „Epistola... de Magnete“, která shrnuje jeho systematické experimenty s kulovitým magnetem vybroušeným z magnetitu, který nazval „terrella“.

Hlavní výsledky:

- Objev magnetických siločar na povrchu, jejich průsečíky nazval póly magnetu
- Rozdělením magnetu na 2 kusy vznikají 2 plnohodnotné magnety, každý se dvěma póly. Naopak opětným složením získáme zpět magnet s původními vlastnostmi.

Význam:

Jde patrně o první experimentální práci z fyziky vůbec, zatím zcela izolovanou. Tato „Epistola“ byla hojně opisována a šířena zejména mezi těmi, kdo využívali kompas.

Pokračovatele ve snahách po vědeckém zkoumání magnetických jevů přineslo však až období renesance na počátku novověku, zhruba o 300 let později.

Z hlediska historie magnetismu mají v době renesance význam hlavně dvě osobnosti: Ital Giambattista della Porta a jeho o 9 let mladší vrstevník, Angličan William Gilbert.

1.3. Giambattista della Porta (1535 – 1615)

Osobnost velmi širokého záběru, zabýval se nejrůznějšími otázkami z oblasti přírodních věd, techniky, ale i lékařství, psychologie, astrologie aj. Magnetismus je pouze jednou z mnoha oblastí, kterými se zabýval. V jeho hlavním přírodovědném díle *Magia Naturalis*, je magnetismus z 20 „knih“ kniha VII. s impresivním názvem „Divy magnetovce“: obsahuje 56 kapitol (statí) detailně popisujících základní vlastnosti magnetovce (magnetitu) a magnetů z něj zhotovených, ukazuje existenci pólů severního a jižního, chování železa v blízkosti magnetitu a podrobnosti o jeho zmagnetování, využití kompasu, snaží se vyvrátit řadu mýtů.

Obecně však lze říci, že zde najdeme málo zásadně nového ve srovnání s 300 let starou „Epistolou“ P. Peregrina.

1.4. William Gilbert (1544 – 1603)

Fyzika byla jeho celoživotní zálibou a magnetismu věnoval hlavní zájem: po 17 letech práce a zkoumání vydává v r. 1600 své stěžejní dílo *De Magnete*, nemající obdoby v tehdejší době.

Gilbert prováděl soustavná měření na magnetech kulového („terrella“) nebo elipsoidového tvaru vyrobených z přírodního magnetitu (magnetovce); studoval magnetickou sílu pomocí zavěšené magnetky a určil směry magnetického při povrchu magnetu a v jeho blízkosti (magnetické siločáry). Porovnáním s údaji (zejména mořeplavců) o inklinaci na různých místech světa došel k novému důležitému závěru, že země je veliký magnet a „terrella“ představuje jeho model.

Z hlediska historie fyziky není bez zajímavosti, že paralelně s magnetickými silami se Gilbert zabýval i elektřinou (název elektrický, elektřina vlastně zavedl právě on). Podařilo se mu vedle jantaru zelektrizovat i řadu dalších látek, jako diamant, křemen, safír či síru. Zabýval se rovněž myšlenkou, zda elektřina a magnetismus spolu nesouvisí.

Význam:

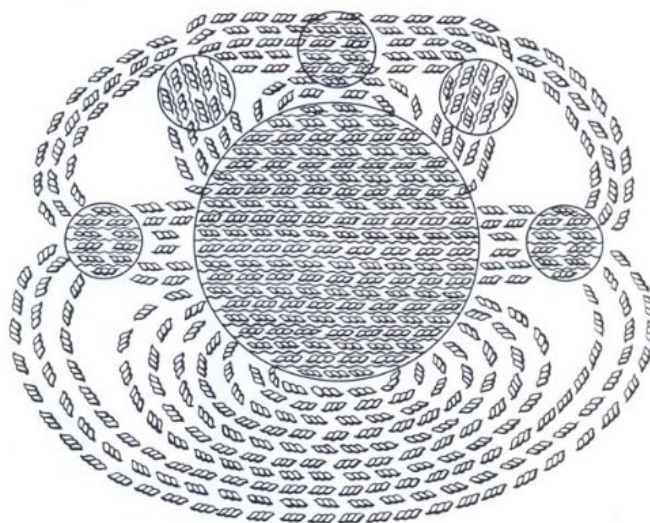
Williama Gilberta lze spatřovat jako skutečného zakladatele nauky o magnetismu, který ověřil a uspořádal základní poznatky o magnetických silách včetně magnetování železa působením trvalého magnetu z přírodního magnetitu (magnetická indukce) a jako první vysvětlil existenci zemského magnetického pole tím, že Země sama je ohromný magnet; de facto jako první podrobně zmapoval pole magnetického dipólu v jeho blízkosti. Navíc svým paralelním zkoumáním magnetických a elektrických jevů, jejich podobností i rozdílů, předjímal budoucí vývoj směřující k objevení elektromagnetismu. Právem bývá tedy W. Gilbert označován jako „otec magnetismu“.

1.5. René Descartes (1596 – 1650)

Francouzský filozof a matematik, považovaný za jednoho z hlavních zakladatelů novověké vědy a filozofie, jeho racionalismus zásadním způsobem ovlivnil další vývoj obou. Mj. je i autorem první teorie magnetismu, která je obsažena v jeho Principiích.

Descartova Teorie magnetismu je dobrou ilustrací jeho deduktivní metody (včetně jejich slabin). Základní myšlenka: Původ magnetismu magnetovce a Země je společný, přitom primární je zemský magnetismus. Jeho nositelem jsou nevažitelné částčky, jakési jemné „závitky“, které neustále proudí nitrem země od pólu k pólu, tam zemi opouštějí a vracejí se vzduchem zpět. Jsou dvojího druhu, pravotočivé a levotočivé, což odpovídá dvěma různým směrům pohybu. Jejich pohyb uvnitř Země jedním nebo druhým směrem je pak umožněn jednosměrnými kanálky, speciálně k tomu uzpůsobenými určitým vnitřním „obrvením“ či „závitem“ pro jeden či druhý typ částice. Magnetovec, který byl původně uvnitř země vybaven těmito „kanálky“, si tuto vlastnost zachovává i mimo zemské nitro. Narazí-li zmíněné částice při své cestě vzduchem zpět k zemskému pólu na magnetovec, nejen ochotně do něj vstupují, ale často jsou jím polapeny a vytvářejí zde jakýsi miniaturní koloběh, analogický tomu zemskému. Tím vznikají póly magnetu. Situaci schematicky ukazuje originální obrázek (obr. 1.1). Železo, jako produkt získaný z magnetitu, resp. železné rudy, má tyto kanálky porušené; prudkými nárazy částček však může dojít k jejich dočasnému (měkké železo) nebo i trvalejšímu (ocel) restituování.

Všichni cítíme, že tento výklad, i když se jeví jako vnitřně konzistentní a logicky vyhovující, je na hony vzdálen realitě a v podstatě ignoruje fakta, neboť se vůbec nezabývá ověřováním důsledků této „teorie“ a ani úvahami o otázkách, které se nutně kolem ní vynoří. Přesto Descartes tvrdí, že touto teorií je schopen vysvětlit všechno, co v té době bylo známo o magnetismu.



Obr. 1. 1 Descartův model zemského magnetismu [1]

Pomineme-li ovšem tyto výhrady a skutečnost, že díky své autoritě fakticky značně zabrzdil hledání nových cest k vysvětlení magnetických jevů a pokrok v jejich zkoumání na dalších možná 100 let, zůstává Descartes velikou postavou v dějinách lidské vzdělanosti s výrazným pozitivním kladem do rozvoje vědy.

1.6. Elektrodynamika a magnetismus

Zatímco 18. století bylo ve fyzice ještě ve znamení Newtonovy mechaniky, která definicemi základních veličin, jako jsou hmotnost, síla, hybnost nebo energie a formulací jejich vzájemných vztahů zásadně ovlivnila uvažování fyziků i v dalších oblastech rodící se vědy, ve století 19. patří tato ústřední pozice elektromagnetismu. Dávná tušení o vzájemné příbuznosti magnetických a elektrických jevů se naplnila a nalezením vzájemných souvislostí a jejich exaktním vyjádřením (Maxwellovy rovnice) byla otevřena cesta k širokému uplatnění v technice a v každodenním životě člověka. Zásadním způsobem byly ovšem ovlivněny i jiné vědní obory, zejména chemie a také další odvětví fyziky samé, především optika.

I když magnetismus v rámci této nové elektrodynamiky zdánlivě ztrácí do určité míry svou vlastní identitu, neubírá mu to na významu a v žádném případě tím nekončí jeho historie. Jeho působíště se záhy přesouvá do rodící se fyziky pevných látek a fyziky materiálů, důležité místo pak zaujímá i ve fyzice atomové, v optice a fyzice elementárních částic, to však již není předmětem této práce [1].

2. TEORIE MAGNETISMU

2.1. Teorie magnetického pole

Pohyb částic s elektrickým nábojem je vždy nutně doprovázen vznikem magnetického pole, projevující se tzv. magnetickými jevy a účinky v jeho okolí. Těmito částicemi s elektrickým nábojem se rozumí protony a elektrony, jež jsou v neustálém pohybu, a tedy ve svém okolí vytváří magnetické pole. Je tedy jasné, že existence magnetických polí (magnetismus), je v tomto smyslu přirozenou součástí všech látek, avšak ne vždy lze jejich magnetické vlastnosti technicky hodnotně využít.

Za jeden z nejdůležitějších projevů magnetického pole můžeme považovat jeho silové účinky na okolí libovolné feromagnetické látky v blízkosti takzvaných pólů zdroje magnetického pole. Dohodou bylo stanoveno označení dvou magnetických pólů:

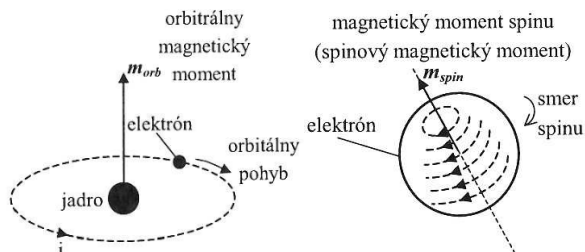
1. „SEVERNÍ“ pól – v české odborné literatuře označován písmenem „S“ (sever), v mezinárodní literatuře je označen písmenem „N“ (z angl.. north) a na zdrojích magnetického pole (např. permanentních magnetech) bývá označován barevným pruhem červené barvy. Dle dohody siločáry magnetického pole v místě severního pólu z tělesa zdroje magnetického pole vystupují.
2. „JIŽNÍ“ pól – v české odborné literatuře je značen písmenem „J“ (jih), v mezinárodní literatuře písmenem „S“ (z angl.. south) a na zdrojích magnetického pole (permanentních magnetech) bývá označován modrou barvou, případně ponechán bez označení. Dohodou bylo stanoveno, že siločáry magnetického pole do tělesa zdroje magnetického pole v místě jižního pólu vstupují a vnitřkem tělesa pokračují zpět k severnímu pólu. Tím tvoří tzv. uzavřené křivky (vírové pole).

Důležitým a v praxi také často využívaným poznatkem je vzájemná interakce magnetických pólů dvou různých zdrojů magnetického pole. Nesouhlasné (též nestejnomené) póly dvou různých zdrojů se navzájem přitahují, souhlasné (stejnomené) póly se naopak vzájemně odpuzují.

Každý elektron má náboj $q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ a otáčí se jednak kolem své vlastní osy a současně periodicky obíhá po svém orbitu (uzavřené dráze). Pohyb elektronu po orbitu je ekvivalentní proudové smyčce tvaru dráhy, takže vytváří magnetický moment podél osy orbitu, který se nazývá orbitální (dráhový) magnetický moment m_{orb} (viz obr. 2.1a). Magnetický moment je vektorovou veličinou. Směr vektoru tohoto orbitálního magnetického momentu se určuje pravidlem pravé ruky, kdy pohyb záporného náboje elektronu je ekvivalentní kladnému proudu ve smyčce vytvořené orbitem, přičemž směr proudu je opačný oproti pohybu elektronu.

Jak již bylo zmíněno, kromě pohybu po orbitu elektrony rotují kolem své vlastní osy. Tento pohyb se označuje jako spin (rotace, točení, víření) elektronu, což je jejich přirozená vlastnost a nezávislá na pohybu po orbitu, který má za následek vznik spinového magnetického momentu m_{spin} , jak lze vidět na obr. 2.1b. Bylo zjištěno, že magnetický moment spinu má velikost $m_{spin} = 9,27 \cdot 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$.

Pozn. Je třeba si uvědomit, že orbitální magnetický moment vytváří každá elektricky nabitá částice, tedy kromě elektronů také protony a celkový magnetický moment atomu je pro exaktní vyjádření dán součtem všech elektronů a protonů, avšak z praktického hlediska je rozhodující podíl magnetických momentů elektronů, proto v tomto případě účinek momentů protonů můžeme zanedbat. [2], [3], [4]



Obr. 2.1 a) orbitální pohyb elektronu, orbitální magnetický moment m_{orb} ,
b) spinový pohyb elektronu, spinový magnetický moment m_{spin} [4]

2.2. Feromagnetismus

Cívka navinutá okolo jádra tvaru prstence tvoří toroid. Proud v závitech cívky vytváří v jádře intenzitu magnetického pole H , která zase vytváří indukci magnetického pole B podle toho, z jakého materiálu je jádro toroidu. Jestliže je uvnitř cívky vakuum, vztah mezi B a H v kterémkoli bodě je vyjádřený vztahem:

$$B = \mu_0 H \quad (2.1)$$

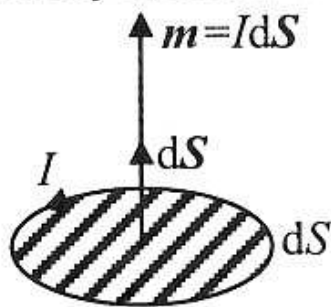
kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$ je permeabilita vakua. Jestliže je jádro toroidu vyplněné vzduchem, resp. pakliže je jádro z neferomagnetického materiálu, kupříkladu ze dřeva, odklon od výše uvedené rovnice je zanedbatelný.

Pokud však jádro ze dřeva nahradíme jádrem ze železa o stejných rozměrech, zjistíme, že magnetický tok, vytvořený totožným proudem v cívce, neobyčejně vzrostl.

Tento neobyčejný nárůst toku je způsoben jevem nazývaným feromagnetismus. Je tak nazývaný proto, neboť byl poprvé pozorován v železe. Feromagnetismus je velmi důležitým faktorem v procesu přeměny energie v elektrických strojích.

Na makroskopický popis tohoto jevu byl použit jednoduchý model atomu (obr. 2.1), ve kterém jak orbitální, tak i spinový pohyb elektronu byl nahrazen elementárními proudovými smyčkami, souvisejícími s magnetickými dipóly, které jsou znázorněny magnetickými momenty těchto smyčkových proudů (obr. 2.1d).

magnetický moment atómu



Obr. 2.2 Magnetický moment proudové smyčky [4]

Magnetické pole vytvořené elementárním smyčkovým proudem I , lemujícím plochu dS , reprezentovanou vektorem dS je charakterizované magnetickým momentem:

$$m = IdS \quad (2.2)$$

ať už orbitálním, nebo spinovým.

Atom, ve kterém magnetické momenty vytvořené spinovým a orbitálním pohybem elektronů nejsou vykompenzované, má určitý výsledný magnetický moment, který se rovná vektorovému součtu všech jednotlivých mechanických momentů.

Jestliže objem ΔV obsahuje n takovýchto atomů, potom je každý z nich reprezentovaný magnetickým momentem m_i , kde $i = 1, 2, \dots, n$. Vektorový součet těchto momentů má za následek vytvoření výsledného magnetického momentu m :

$$m = \sum_{i=1}^n m_i \quad (2.3)$$

Objemová hustota magnetických momentů charakterizuje magnetizaci materiálu, které je dána vektorem magnetizace M :

$$M = \lim_{\Delta V} \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n m_i = \lim_{\Delta V} \frac{1}{\Delta V} m \quad (2.4)$$

V přítomnosti vnějšího magnetického pole s magnetickou indukcí B , působí na magnetický dipól s magnetickým momentem m síla, která se ho snaží zařadit s B , tj. natočit tak, aby působil paralelně s B , tedy aby měl stejný směr s B .

Magnetická indukce B je složena ze dvou složek. Jenda z nich je magnetická indukce vakua, $B_0 = \mu_0 H$, kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{H} \cdot \text{m}^{-1}]$ je permeabilita vakua a druhá složka je příspěvek magnetizace materiálu $\mu_0 M$, teda:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (H + M) \quad (2.5)$$

kde $H = \frac{B}{\mu_0} - M$ intenzita magnetického pole.

V magnetických materiálech vztah mezi H a M může být daný nelineárním, hysteretickým operátorem, ale v lineární oblasti materiálů je vztah mezi magnetizací M a intenzitou magnetického pole H daný magnetickou susceptibilitou χ :

$$M = \chi H \quad (2.6)$$

Ve vztahu (2.6) je χ konstantou úměrnosti mezi magnetizací M (magnetickým momentem objemové jednotky) a intenzitou pole H . χ však ve všeobecnosti nemusí být skalár a pro anizotropní materiály má tvar tenzoru:

$$M = [\chi] H \quad (2.7)$$

Ten reprezentuje změnu magnetických vlastností se směrem přiloženého pole.

V takovémto případě intenzita magnetického pole H a vektor magnetizace m mohou mít ve všeobecnosti různé směry. Měřené hodnoty magnetické susceptibility jsou v rozsahu od 10^{-5} pro měkké magnetické materiály až k 10^6 pro tvrdé magnetické materiály. Pokud dosadíme (2.6) do (2.5), dostaneme:

$$B = \mu_0 H + \mu_0 \chi H = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu_r H \quad (2.8)$$

kde vztah mezi magnetickou indukcí a intenzitou přiloženého magnetického pole je vyjádřený pomocí relativní permeability:

$$\mu_r = 1 + \chi \quad (2.9)$$

Je to faktor, který charakterizuje prostředí, v kterém se vytváří magnetické pole a kterým se znásobuje magnetická intenzita kvůli přítomnosti feromagnetického materiálu, tedy μ_r udává, kolikrát je permeabilita v prostředí vyplněním feromagnetickou látkou větší než ve vakuu při shodných podmínkách. Tuto linearizaci vztahu $B = f(H)$ je možné použít jen pro začátek nasycení.

Pozn.: $\mu_r = 1$ pro vakuum a 1,02 – 1,10 pro permanentní magnety podle druhu materiálu.

Jak vyplývá z výše uvedeného, vektor magnetizace M má rozměr shodný s intenzitou magnetického pole $H[A \cdot m^{-1}]$ a udává moment, který působí na jednotkový objem tělesa v homogenním poli s magnetickou indukcí 1 T.

Druhou složkou ve výrazu (2.5) $\mu_0 M$ se nazývá magnetická polarizace a označuje se J .

$$J = \mu_0 M \quad (2.10)$$

Magnetická polarizace J má rozměr shodný s magnetickou indukcí B [T] a udává moment, který působí na jednotkový objem tělesa v homogenním poli o intenzitě $1 A \cdot m^{-1}$.

Pro vakuum (a vzduch) je vždy $M = 0$, proto i $J = 0$ a platí vztah:

$$B_0 = \mu_0 H_0 \text{ resp. pro elektrické stroje obvykle: } B_\delta = \mu_\delta H_\delta$$

Index δ používáme v teorii elektrických strojů na označení dějů ve vzduchové mezeře stroje, kde δ se označuje radiální délka.

Na základě magnetické susceptibility se magnetické materiály dělí na diamagnetické, paramagnetické, feromagnetické, antiiferomagnetické a feromagnetické. [2], [4]

2.3. Rozdělení materiálů podle chování v magnetickém poli

Z hlediska velikosti magnetického momentu atomů dělíme látky na diamagnetické, jejichž atomy nemají magnetický moment a paramagnetické, jejichž atomy mají magnetický moment.











Má-li atom magnetický moment, dochází ve vnějším magnetickém poli k silovému účinku, následkem kterého se magnetický moment snaží orientovat do směru působení vnějšího magnetického pole, aby měl atom co nejmenší potenciální energii. Tato orientace však nenastává bez překážek. Brání jí neustálý chaotický tepelný pohyb atomů. To znamená, že při určité intenzitě magnetického pole je orientovanost tím menší, čím vyšší je teplota. V některých paramagnetických látkách nastává za vhodných podmínek samovolně takové uspořádání atomů, že v celých oblastech (doménách) jsou jejich magnetické momenty následkem vzájemného působení atomů orientovány paralelně (rovnoběžně). Látky v tomto stavu se nazývají feromagnetické (feromagnetika).

Existují však i takové paramagnetické látky, v jejichž doménách za vhodných podmínek dojde k antiparalelní orientaci magnetických momentů atomů (jsou uspořádány rovnoběžně, avšak s navzájem opačnými směry působení). Látky v tomto stavu se nazývají antiiferomagnetické látky (antiiferomagnetika). Některé antiiferomagnetické látky se skládají z

několika druhů atomů, které se liší velikostí magnetického momentu. Následkem toho mají jejich domény nevykompenzovaný magnetický moment. Látky tohoto druhu se nazývají ferimagnetické látky (ferimagnetika).

Uspořádání magnetických momentů různých typů materiálu a jejich základní vlastnosti jsou přehledně zapsány v tabulce 1. [2], [3], [4]

Tabulka 1. Základní rozdělení druhů magnetismu a jejich vlastnosti [2]

Dia magnetismus	Para magnetismus	Fero magnetismus	Feri magnetismus	Antifero magnetismus
Předpoklady:				
Atomy s obsazenými drahami	Atomy s neobsazenými drahami	Atomy s neobsazenými drahami	Atomy s neobsazenými drahami určité mřížkové struktury	Neuzavřené dráhy, velmi malá vzdálenost atomů
Magnetický moment:				
Bez vnějšího pole není magnetický moment. Kompenzace spinových momentů.	Moment je ↓, existuje bez vnějšího pole. Nepravidelné rozdělení momentových směrů.	Moment ↑, spontánní magnetizace. Weissovy domény, elementární magnety.	Moment existuje v důsledku neúplné kompenzace.	Kompenzace momentů v důsledku antiparalelního postavení.
Směr momentů:				
				
				
Permeabilita (susceptibilita):				
$\mu_r < 1$ ($\chi < 0$)	$\mu_r > 1$ ($\chi > 0$)	$\mu_r \gg 1$ ($\chi \gg 0$)	$\mu_r \gg 1$ ($\chi \gg 0$)	$\mu_r \approx 1$
Příklady materiálů:				
Cu, Au, Ag	Al, Sn, Pt	Fe, Co, Ni	Ferity	MnO

V této práci se budu dále podrobněji zabývat pouze feromagnetickými materiály.

2.4. Feromagnetické materiály, Feromagnetismus

Většina materiálů má takové uspořádání, že vzájemnou interakcí opačných magnetických momentů sousedních atomů se magnetické momenty jednotlivých atomů vyruší.

Takové uspořádání, kdy magnetické momenty atomu mají stejný směr, vzájemně se sčítají a tím pádem vykazují vlastnosti feromagnetismu, se vyskytuje pouze u pěti prvků, kterými jsou:

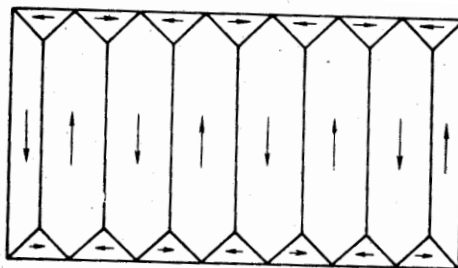
- Železo Fe
- Kobalt Co
- Nikl Ni
- Gadolinium Gd
- Dysprosium Dy

Je vhodné si uvědomit, že atomy feromagnetického materiálu jsou paramagnetické.

Existují případy, kdy slitiny některého z těchto pěti prvků v kombinaci i s neferomagnetickými prvky vykazují feromagnetické vlastnosti.

Experimentálně bylo zjištěno, že feromagnetický materiál je rozdělen do tzv. magnetických domén (též Weissových oblastí) mikroskopické velikosti o objemu $0,001 \div 1 \text{ mm}^3$, ve kterých jsou magnetické momenty atomů natočené souhlasně. Ve feromagnetických materiálech platí skutečnost, že i bez vnějšího magnetického pole dochází ve Weissových doménách k nasycené magnetizaci. Tyto domény jsou od sebe odděleny tzv. Blochovými stěnami o tloušťce $10^{-6} \div 10^{-8} \text{ mm}$, což je rozhraní domén, kde dochází ke změně směru magnetických momentů.

Přestože ve feromagnetikách existují domény, v nichž je látka zmagnetizována, navenek se těleso složené z těchto feromagnetik jeví jako nezmagnetizované. Domény jsou totiž uspořádány tak, aby celková energie soustavy byla co nejmenší. Takovéto uspořádání domén ve feromagnetiku lze vidět na obr. 2.3.

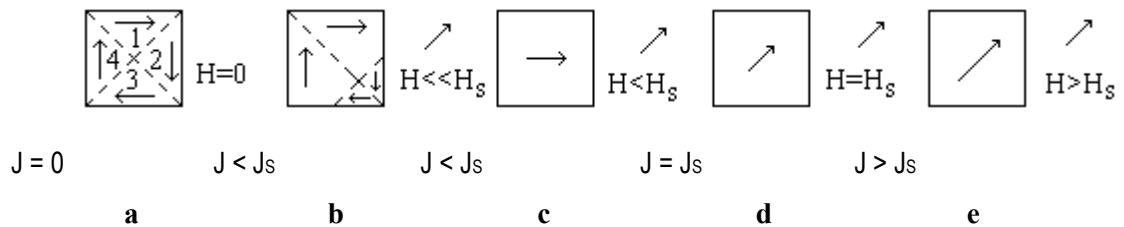


Obr. 2.3 Energeticky nejvýhodnější uspořádání domén ve feromagnetiku [2]

Zvyšování počtu domén probíhá pak do té doby, než nárůst celkové energie spojené s tvorbou Blochových stěn nepřekročí úbytek energie vyvolaný dělením domén.

Pokud feromagnetickou látku, která po ochlazení s teplotou nižší než Curierův bod nebyla ještě zmagnetizována, vložíme do vnějšího magnetického pole, jeho magnetizace se bude měnit vlivem pohybu stěn a natáčení (rotace) Weissových domén. Domény, u kterých se směr magnetizace nejvíce shoduje se směrem vnějšího magnetického pole, na úkor ostatních domén zvětšují svůj objem a postupně se natácejí do směru vnějšího magnetického pole.

Látka se bude postupně čím dál více magnetizovat, až při dostatečně velké intenzitě magnetického pole H se látka uvede do stavu magnetického nasycení (obr. 2.4, 2.5).



Obr. 2.4 Schéma procesu magnetování feromagnetické látky [2]

a.... $H = 0$, domény spontánně magnetovány do stavu nasycení J_s ve směru „snadné magnetizace“,

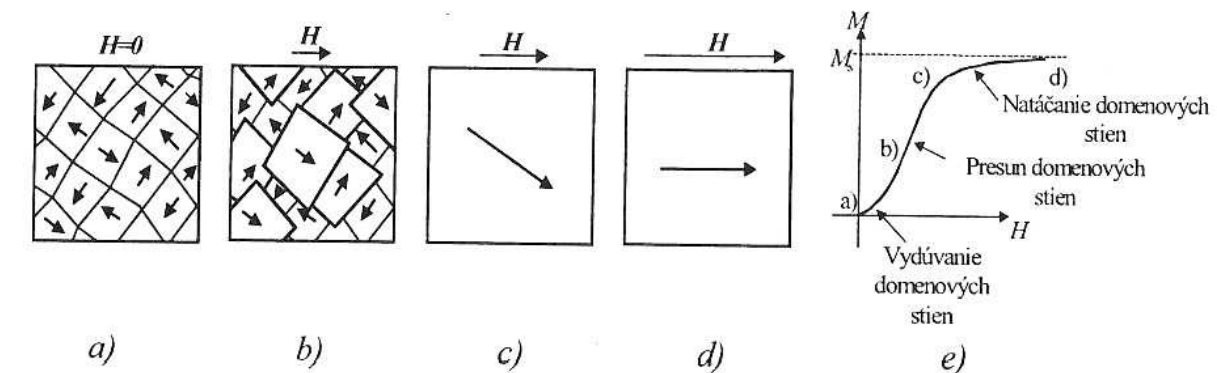
1,2,3,4 – směry krystalografických os (pro Fe)

b, c... $H < H_s$, celé feromagnetikum tvořeno jedinou doménou

d... $H = H_s$, směr J_s se stáčí do směru vnějšího pole

e.... $H > H_s$, poněkud vzrůstá $J > J_s$

Jiné grafické znázornění stejného procesu magnetování můžeme vidět na obrázku 2.5:



Obr. 2.5 Znázornění procesu magnetování feromagnetické látky [4]

Na tomto obrázku bude popsán základní princip procesu pohybu domén ve feromagnetikách.

Jelikož magnetizační křivka souvisí s doménovou strukturou feromagnetických látek a je známa funkční závislost:

$$J = f(H) \quad (2.11)$$

kde J magnetická polarizace (T)

H intenzita magnetického pole ($A \cdot m^{-1}$),

jedinou sledovanou veličinou v tomto případě bude pouze intenzita magnetického pole H .

Na obr. 2.5a je vidět nezmagnetizovaný stav. Orientace domén je nepravidelná a náhodně uspořádaná tak, že výsledná magnetizace je nulová. Vnější pole je taktéž nulové, tedy $H = 0$. Pokud materiál vystavíme vnějšímu magnetickému poli o intenzitě H , domény se směrem nejvíce shodným s vnějším polem se začnou zvětšovat a rozšiřovat (obr. 2.5b). Tento děj lze ještě považovat za vratný proces. Pokud se vnější magnetické pole bude dále zvětšovat a H zvyšovat, může být dosaženo kritické hodnoty intenzity magnetického pole, kdy se skokem vytvoří velká magnetická oblast, přičemž celý krystal tvoří jedinou doménu, kterou tvoří bývalé domény s nejvíce se shodujícími magnetickými momenty s vnějším polem a nevýhodně uspořádané domény vymizí. Tento proces je již pochodem nevratným (obr. 2. 5c). Při dalším zvětšování intenzity magnetického pole se budou domény natáčet ve směru vnějšího magnetického pole, až se všechny zařadí v jeho směru (obr. 2.5d). Pokud se tak stane, materiál je ve stavu nasycení (trvalého magnetismu) a další zvyšování H nemá na magnetizaci vliv. [2], [3], [4]

2.4.1. Maximální magnetizace feromagnetických materiálů

Pomocí mnoha rovnic a výpočtů, podrobně popsanych v [4], bylo explicitně zjištěno, že maximální možná magnetická indukce vytvořená ve vakuu by byla rovna:

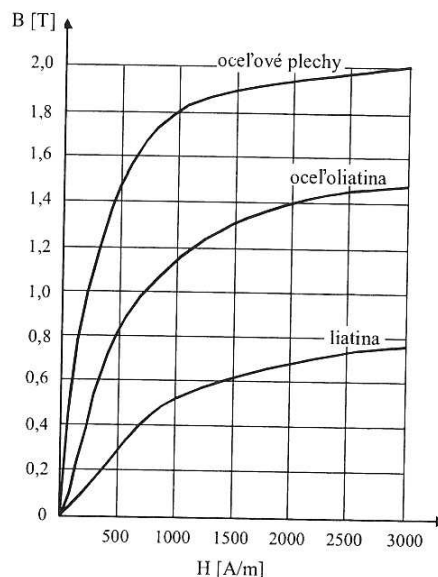
$$J_{\max Fe} = \mu_0 M_{\max Fe} = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 1,73 \cdot 10^6 = 2,18 \text{ T} \quad (2.12)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [H \cdot m^{-1}]$ permeabilita vaku

$M_{\max Fe} = 1,73 \cdot 10^6 [A \cdot m^{-1}]$ maximální možná hodnota magnetizace železa

Jak je z předešlého vidět, při úplné magnetizaci železa by tedy ideální hodnota dosáhla 2,18 T.

Na obrázku 2.6 jsou pro ilustraci znázorněny magnetizační křivky některých materiálů:



Obr. 2.6 Magnetizační křivky některých základních elektrotechnických materiálů [4]

Jak lze z magnetizačních křivek na obr. 2. 6 vyčíst, magnetická indukce B se nejrychleji zvětšuje při zvyšování magnetické intenzity H z nuly. Pro pohyb stěn domén, a tím dovození velkému množství atomových momentů k zařazení s H , tedy stačí malá hodnota H přiloženého magnetického pole. Další magnetizace závisí na skutečnosti, zda-li další hodnoty H jsou dostatečně vysoké na to, aby způsobili natočení atomových momentů do směru shodného s H . Toto zploštění charakteristiky je způsobené tzv. nasycením železa. Úplné nasycení, odpovídající maximální magnetizaci M_{\max} , resp. J_{\max} by nastalo tehdy, pokud by se všechny atomové monety zařadili zcela shodně s osou přiloženého pole H .

Z obr. 2. 6 je rovněž patrné, že například při intenzitě magnetického pole $H = 3000 \text{ [A} \cdot \text{m}^{-1}]$ je magnetická indukce pro litinu (slitinu železa a uhlíku) pouze 0,76 T, což je hodnota téměř třikrát menší než ideální hodnota 2,18 T. Materiál z ocelových plechů, který je často využíván pro magnetické systémy, oproti tomu dosahuje při $H = 3000 \text{ [A} \cdot \text{m}^{-1}]$ už 1,99 T, což je přibližně 92 % hodnoty maximální magnetizace železa 2,18 T. Z tohoto je možno vidět, že některé materiály se mohou velmi přiblížit teoretickému limitu magnetizace už při poměrně malých hodnotách H . [2], [3], [4]

2.4.2. Vliv teploty na feromagnetický materiál

Feromagnetické látky (feromagnetika) se vyznačují tím, že při teplotách nižších, než je Curieův bod (T_c), v nich existují oblasti, tzv. feromagnetické domény, ve kterých následkem vzájemného působení atomů jsou magnetické momenty těchto atomů uspořádány paralelně. Aby se mohly atomy takto vzájemně ovlivňovat, musejí být v dostatečné blízkosti. Tento předpoklad je splněn pouze pro pevné látky.

Zvyšování teploty materiálu způsobuje, že každý atom začne oscilovat okolo své střední polohy v krystalické mřížce, začnou se od sebe postupně vzdalovat a počet paralelně uspořádaných atomových magnetických momentů se postupně zmenšuje, až při teplotě T_c , známé jako Curieho teplota, se toto paralelní uspořádání atomových momentů vytratí úplně, zanikají feromagnetické domény a tím i feromagnetický stav látky, tedy magnetické momenty se uspořádají zcela náhodně.

Zjednodušeně lze tedy říci, že překročení Curieho teploty T_c vede k přeměně feromagnetika na paramagnetikum.

Pro úplnost zmiňme, že Curieho teplota železa je $T_{cFe} = 770\text{ °C}$. Protože většina elektrických strojů pracuje při provozní teplotě zpravidla menší než 150 °C , je vliv na feromagnetické vlastnosti železa malý. Vliv teploty může být důležitější u niklu, u kterého Curieho teplota dosahuje přibližně $T_{cNi} = 348\text{ °C}$, avšak největší důraz na vliv teploty je kladen pro prvky vzácných zemin, kde se Curieho teplota může dostat i pod normální pokojovou teplotu. [2], [4]

2.5. Permanentní magnetismus

Magnetický tok ve vzduchové mezeře elektrického stroje je možné vytvořit budícím vinutím, kterým protéká budicí proud, tedy elektromagnetem, nebo permanentním magnetem (PM). Největší výhodou magnetického systému s PM je ten, že nevyžaduje žádné budicí cívky a tedy nevytváří ztráty v budícím vinutí, čili pracuje s vyšší účinností.

Permanentní magnetismus nedefinované kvality má jakýkoliv feromagnetický materiál, pokud je podroben celému cyklu magnetizace od $+H$ do $-H$, a vykazuje v hysterezní smyčce určitou remanentní indukci $\pm B_r$.

Některé materiály charakterizuje mnohem trvanlivější permanentní magnetismus, než v železe. Jsou to převážně slitiny železa, niklu a kobaltu, třech prvků feromagnetických materiálů. Tyto materiály jsou obvykle vystavené tepelnému zpracování, které má za následek mechanickou tvrdost vyrobeného magnetu. Z tohoto důvodu, tedy z hlediska potřeb elektrotechnického průmyslu, se vžilo rozřazení magnetických materiálů na magneticky měkké materiály a magneticky tvrdé materiály.

2.6. Rozdělení magnetických materiálů

2.6.1. Magneticky měkké materiály

Magneticky měkké materiály se vyznačují úzkou hysterezní smyčkou (obr. 2.7). Zdůrazněnými vlastnostmi jsou počáteční permeabilita μ_i , maximální permeabilita μ_{max} a maximální magnetická indukce B_{max} , které mají být co největší a naproti tomu mála koercitivita H_c . Kromě těchto základních požadavků se můžeme setkat s požadavky na některé speciální vlastnosti, jakými mohou kupříkladu být velký poměr B_r/B_{max} pro materiály s pravoúhlou

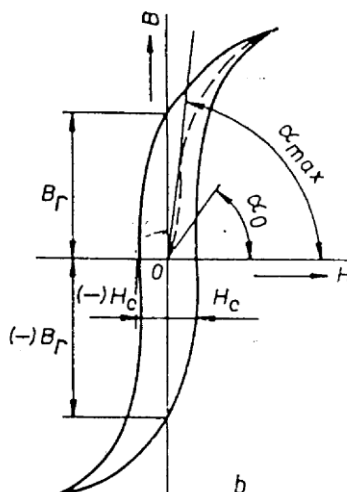
hysterezní smyčkou, magnetostrikční vlastnosti $\lambda_{B\max}$, vysoká nebo naopak nízká Curieho teplota T_c , konstantní permeabilita, vysoký elektrický odpor apod.

Výroba magneticky měkkých materiálů je poměrně náročná, především z důvodu potřeby co nejmenšího obsahu cizích nečistot. Těchto cílů se dosahuje především výběrem surovin, legováním a vhodným vedením tavby. Nejvhodnější krystalické struktury se pak dosahuje kombinací tvářecích postupů a žhacími operacemi.

Magneticky měkké materiály bývají často také mechanicky měkké materiály. [2], [4]

Pro příklad můžeme uvést několik základních magneticky měkkých materiálů [2]:

- Technicky čisté železo (železo Armaco)
- Křemíkové oceli
- Slitiny s velkou počáteční permeabilitou (slitiny Ni-Fe)
- Slitiny PERMALLOY
- Slitiny s různým procentuálním obsahem niklu (75÷80%, 50%, 36%, 30%)
- Slitiny Fe-Co
- Magnetická skla
- Kovová skla aj.



Obr. 2. 7 Hysterezní smyčka magneticky měkkého materiálu [2]

2.6.2. Magneticky tvrdé materiály

Magneticky tvrdých materiálů se v technické praxi používá k výrobě trvalých (permanentních) magnetů (PM). Jedná se o materiál, který lze jen těžko zmagnetizovat a zejména obtížně přemagnetizovat či zbavit permanentního magnetismu. Může se tak stát pouze účinkem silného vnějšího magnetického pole. Tyto materiály, oproti magneticky měkkým materiálům, charakterizuje široká hysterezní smyčka (obr. 2.8). U těchto materiálů vyžadujeme

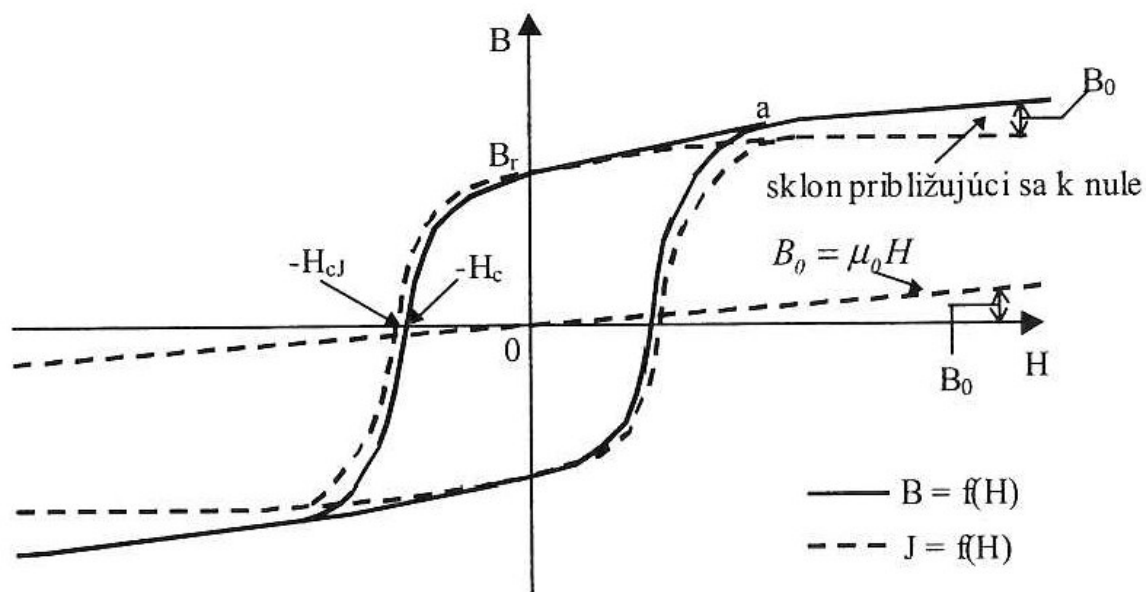
vysokou hodnotu koercitivní intenzity magnetického pole (koercitivity) H_c , remanentní magnetické indukce (remanence) B_r a v neposlední řadě energetického součinu $(BH)_{\max}$, jež jsou nejdůležitějšími a nejsledovanějšími magnetickými parametry permanentních magnetů.

Tyto a spoustu dalších sledovaných parametrů trvalých magnetů, se určují pomocí tří základních křivek vzájemných závislostí magnetických parametrů, jejichž zjištěné hodnoty (např. H_c , B_r) jsou uvedeny katalogu výrobců těchto materiálů. Jsou to:

- Křivka prvotní magnetizace (panenská křivka)
- Hysterezní smyčka
- Demagnetizační křivka

Nutno poznamenat, že křivka prvotní magnetizace a demagnetizační křivka jsou v podstatě dílčí součásti hysterezní smyčky, ovšem v literatuře se děje, odehrávající se na těchto úsecích, popisují a hodnotě samostatně

Jak již bylo zmíněno, protože jsou všechny výše uvedené parametry nejsledovanějšími vlastnostmi na kritéria výběru materiálů pro výrobu permanentních magnetů, využívaných také v elektrických strojích, budou detailněji rozebrány v následujících kapitolách. [2], [3], [4]



Obr. 2. 8 Hysterezní smyčka magneticky tvrdého materiálu [4]

2.1.1.1 Křivka prvotní magnetizace (panenská křivka)

Křivka prvotní magnetizace vyjadřuje (znázorňuje) závislost magnetické indukce B na měnící se hodnotě vnější intenzity magnetického pole materiálu, který ještě nebyl magnetován.

Matematické vyjádření této závislosti bude tedy: $B = f(H)$ a její grafické znázornění lze vidět na obr. 2. 5e.

Vycházejme z předpokladu, že magnetizujeme látku z feromagnetického materiálu, jež ještě nebyla zmagnetizována. Po vložení feromagnetika do vnějšího magnetického pole a následném zvětšování jeho magnetické intenzity H , se začnou vlivem vnějšího magnetického pole posouvat doménové (Blochovy) stěny, a tím se zvětšuje celkový objem domén s nejhodnějším magnetickým momentem s polem vnějším. Toto je ještě vratný děj.

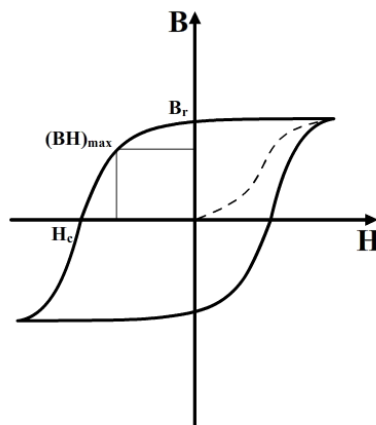
Zvyšováním intenzity magnetického pole H se postupně zvětšuje také objem domén s příznivou orientací magnetických momentů na úkor domén s nepříznivou orientací. Tyto změny se uskutečňují skokovými a již nevratnými posuny.

Dalším zvětšováním H se doménové stěny již neposouvají, neboť celé feromagnetikum tvoří jednu doménu. Dalšího zvětšení B lze však dosáhnout postupným natočením všech magnetických momentů do směru H , čehož lze docílit pouze ve velkých magnetických polích. Po tomto natočení dochází k tzv. magnetickému nasycení látky. Ve stavu technického nasycení již má zvyšování H za následek pouze takové zvyšování B , které jednak odpovídá zvyšování B ve vakuu, tedy $B_0 = \mu_0 H$ a dále je způsobené elastickým natáčením domén, podobně jako v případě magneticky měkkých materiálů. Z toho plyne, že při velmi vysokých hodnotách H se sklon charakteristiky $B = f(H)$ přibližuje ke sklonu přímky s hodnotou permeability vakua μ_0 . [2], [4]

2.1.1.2 Hysterezní smyčka

Jestliže po zmagnetizování feromagnetika až do stavu nasycení intenzitu vnějšího magnetického pole postupně zmenšujeme, magnetická indukce má větší hodnoty než při prvotní magnetizaci (obr. 2.9).

Tento jev se nazývá magnetická hystereze. Zrušíme-li vnější magnetické pole, indukce neklesne na nulovou hodnotu, ale zůstane na určité hodnotě B_r , která se nazývá remanentní magnetická indukce (též zbytková indukce, remanence). Jestliže pak feromagnetikum magnetizujeme v opačném směru, indukce se postupně zmenšuje až na nulovou hodnotu. Intenzita magnetického pole, při níž se zruší B_r , se nazývá koercitivní intenzita magnetického pole (koercitivita), označována symbolem H_c . Jestliže se intenzita magnetického pole H v opačném směru dále zvětšuje, nastává zvětšování magnetické indukce až do stavu nasycení. Při zmenšování intenzity magnetického pole se indukce zmenšuje. Změní-li se opět směr intenzity magnetického pole, zvětší se i intenzita a to až na hodnotu odpovídající stavu nasycení. Tím se dokončí celý magnetizační cyklus, jehož grafickým znázorněním je maximální hysterezní smyčka.



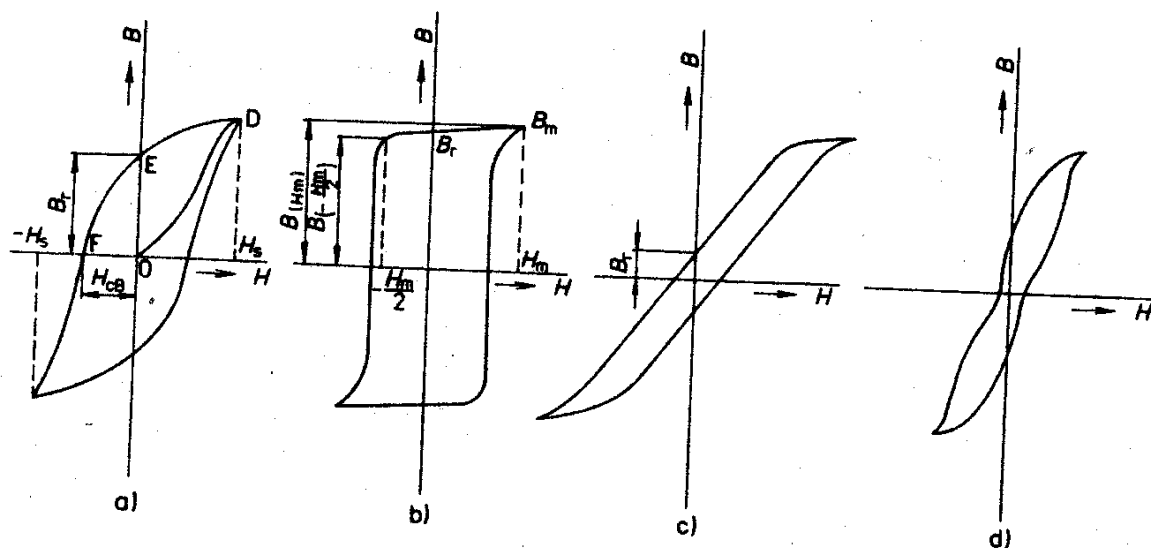
Obr. 2.9 Hysterezní smyčka magneticky tvrdého materiálu, včetně křivky prvotní magnetizace [2]

Feromagnetické látky lze snadno zmagnetizovat už ve slabých magnetických polích a zůstávají zmagnetovány i po zrušení vnějšího magnetického pole. Lze je přemagnetovat tak, aby magnetická indukce B byla opačná. Tyto látky mají velmi velkou relativní permeabilitu, jejíž hodnota může dosáhnout až $\mu_r = 10^6$, je však velmi závislá především na teplotě a intenzitě magnetického pole H .

Obecně lze tedy napsat, že hysterezní smyčka feromagnetického materiálu (obr. 2.10) je uzavřená magnetizační křivka, která vyjadřuje závislost $B = f(H)$ při pomalé, plynulé změně intenzity magnetického pole od $+H_s$ do $-H_s$, získaná provedením jednoho cyklu magnetování. [2], [3], [4]

Podle [2] rozlišujeme několik typů hysterezních smyček:

- a) normální – poměr $B_r/B_s = 0,5 \div 0,8$ (obr. 2.10a)
- b) pravoúhlý – poměr $B_r/B_s \approx 1$ (obr. 2.10b)
- c) plochý – poměr $B_r/B_s = 0,1 \div 0,2$ (obr. 2.10c)
- d) perminvarový – smyčka je ve střední části zúžená (obr. 2.10d).



a) normální typ

b) pravoúhlý typ

c) plochý typ

d) perminvarový typ

Obr. 2.10 Typy hysterezních smyček [2]

kde	H_c	koercitivní intenzita magnetického pole
	H_s	maximální hodnota intenzity magnetického pole
	B_r	remanentní magnetická indukce
	B_s	maximální hodnota magnetické indukce

2.1.1.3 Demagnetizační křivka

Tato křivka je část charakteristiky hysterezní smyčky, která odpovídá jejímu druhému kvadrantu. Je patrně tou nejdůležitější částí hysterezní smyčky při popisování vlastností jednotlivých materiálů PM, které mohou být součástí elektrických strojů, neboť zachycuje pracovní oblast trvalého magnetu a její významné body. Demagnetizační křivka je grafickým znázorněním procesu známého pod pojmem demagnetizace (odmagnetování), při kterém se snižuje celková magnetická polarizace magnetu působením vnějšího magnetického pole opačného směru ke směru polarizace. Kromě toho je však také každý magnet vystaven působení vnitřního demagnetizačního pole H_d .

Velikost vnitřního demagnetizačního pole H_d je dána vztahem:

$$H_d = -\frac{K_d J}{\mu_0} \quad (2.13)$$

kde	K_d	demagnetizační faktor
	J	magnetická polarizace
	μ_0	permeabilita vakua

Faktor K_d je závislý na tvaru magnetu a směru magnetování. Kvůli poměrně složitému výpočtu přesné hodnoty tohoto faktoru se při výpočtu využívá tabulkových hodnot nebo matematických aproximací. [2], [4]

2.7. Stabilizace PM (Pracovní bod)

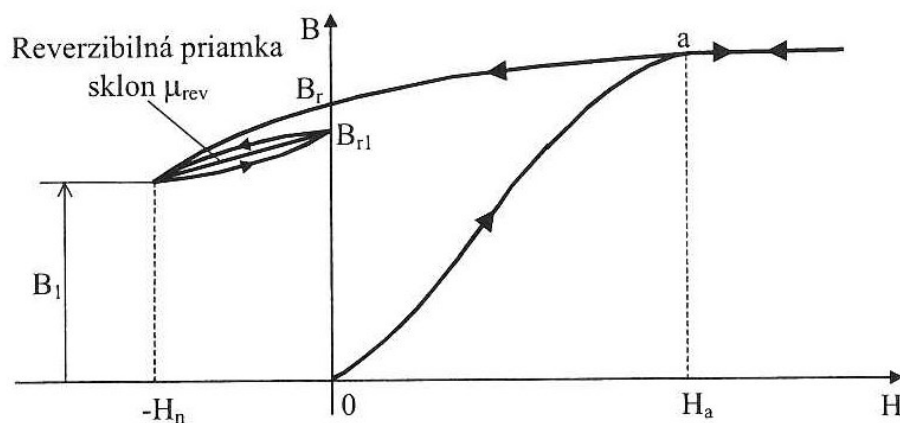
Jak již bylo zmíněno v kap. 2.6.2.3, s demagnetizační křivkou je spojena také pracovní oblast PM. Stabilizace PM pak znamená dobře uvážené zhoršení jeho vlastností částečnou demagnetizací. Uveďme alespoň tři důvody, proč se tak děje:

1. Snížení účinků změn teploty během chodu
2. Ochrana PM proti nereverzibilnímu zhoršení a jeho vlastností vlivem demagnetizujících polí
3. Kalibrace PM z důvodu jejich přesně definovaných vlastností

Představme si jádro toroidu z tvrdého magnetika, kolem něhož je navinuta cívka. Na obr. 2. 11 je vidět křivku v prvním kvadrantu, kterou bychom dostali, jestliže by proud v cívce rostl z nuly na hodnotu $H > H_a$ a posléze klesl zpět na nulu.

Pokud však k tomuto jádru přiložíme pole magnetické intenzity $-H_n$, magnetická indukce klesne na hodnotu B_l a po následném odstranění $-H_n$ se magnetická indukce vrátí podél elementární smyčky na hodnotu B_{r1} . Při opětovném přiložení $-H_n$ se sníží magnetická indukce přibližně na stejnou hodnotu B_l jako předtím. Tím se zkompletovala elementární hysterezní smyčka, která se v praxi nahrazuje krátkou úsečkou, jejíž směrnice určuje reverzibilní (vratnou) permeabilitu. Tato směrnice je přibližně shodná s původní směrnicí v bodě $H = 0$, pro ideální charakteristiku PM, tedy $B = B_r$ by byla směrnice μ_0 .

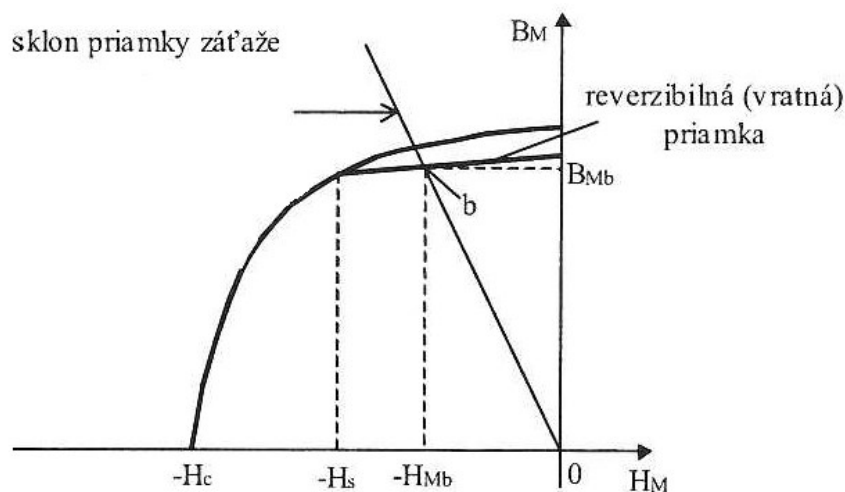
Pokud hodnota přiloženého magnetického pole nepřekročí intenzitu $-H_n$, bude magnet považován za v rozumné míře permanentní. Jestliže však bude tento PM vystaven působení intenzity magnetického pole hodnotou $-H > -H_n$, magnetická indukce se sníží na hodnotu nižší než B_l . Je tedy zřejmé, že po odstranění této intenzity $-H$ se vytvoří nová, níže položená vratná přímka, která vede na $B_r < B_{r1}$.



Obr. 2.11 Charakteristika $B = f(H)$ materiálu PM při prvotní magnetizaci a následné demagnetizaci [4]

Pokud je magnetický systém s PM vystavený demagnetizační intenzitě (např. u elektrických strojů účinkem reakce kotvy), nebude PM pracovat na demagnetizační křivce, nýbrž na reverzibilní charakteristice (viz kap. 2.7). V praxi je tato přímka určena tzv. stabilizováním magnetu:

Po prvotní magnetizaci se na PM přiloží největší možná demagnetizační (stabilizující) intenzita magnetického pole H_s , které může být PM vystavený v průběhu jeho provozu v magnetickém systému. Pracovní bod PM pak dostaneme jako průsečík přímky zátěže s reverzibilní přímkou (obr. 2. 12). Souřadnice pracovního bodu nám udávají provozní hodnoty B_m a H_m a jejich součin bude v praxi vždy menší, než energetický součin $(BH)_{\max}$, teoreticky se pak pracovní bod b shoduje s $(BH)_{\max}$. [2], [4]



Obr. 2.12 Pracovní bod při stabilizaci magnetu [4]

2.8. Maximální energetický součin $(BH)_{\max}$

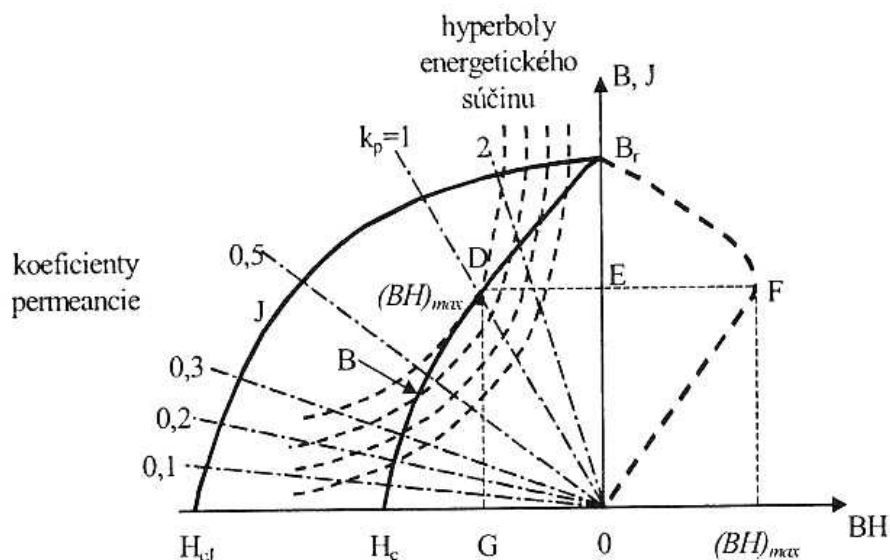
Důležitým bodem na demagnetizační křivce je bod, u kterého absolutní hodnota součinu odpovídajících si hodnot B a H má maximum. Je to maximální energetický součin $(BH)_{\max}$, který je důležitým kvalitativním ukazatelem a používá se na hodnocení užitečných vlastností materiálů PM.

Součin (BH) popisuje vnější energii vytvářenou jednotkovým objemem daného materiálu PM. Při B_r a H_c je tato vnější energie nulová, svého maxima pak dosahuje v bodě $(BH)_{\max}$. Největší možný energetický součin $(BH)_{\max}$ tedy popisuje nejvyšší tok energie dosažitelné s tímto materiálem, což je kritérium, kterého se využívá pro porovnání vlastností různých materiálů PM. Čím vyšší je jeho hodnota, tím menší může být při jinak stejných poměrech objem magnetu, potřebný pro určité zadání.

Přestože se dá říci, že energetický součin magnetu (BH) je zkrátka součinem B a H v magnetu, neznámá to, že právě takováto energie je v určitém okamžiku v magnetu uložena. Je však mírou uložené energie a co je důležitější, ukazuje, jak je materiál PM odolný vůči demagnetizačním vlivům vnějšího pole.

Tvar křivek jednotlivých hodnot konstantního energetického součinu je takový, že se jedná o rovnoosé hyperboly, kreslené zpravidla v druhém kvadrantu společně s demagnetizační křivkou. Spolu s jinými důležitými údaji o materiálech PM, jsou i tyto křivky nakresleny v katalogu výrobců PM.

Maximální energetický součin $(BH)_{\max}$ daného materiálu se nachází v místě, kde je jeho demagnetizační křivka tečnou k hyperbole příslušného energetického součinu. Charakteristická demagnetizační křivka $J = f(H)$, $B = f(H)$ i $(BH) = f(B)$ je na obr. 2.13



Obr. 2.13 Všeobecný tvar demagnetizační charakteristiky [4]

Z obr. 2.13 je rovněž patrné, že pokud bude reverzibilní permeabilita jednotková ($\mu_{\text{rev}} = 1$), pak $(BH)_{\text{max}}$ nastane při přímce zátěže $D = \mu_0$, tedy koeficient permanence $k_p = 1$, a to za předpokladu nepůsobení žádného vnějšího demagnetizujícího pole jiných vinutí či magnetů.

Po dílčích dosazeních do rovnic podrobně uvedených v [1] zde uvedme ty nejdůležitější:

Obecný výraz pro energetický součin $(BH)_{\text{max}}$:

$$(BH)_{\text{max}} = \frac{B_{\delta} \cdot H_{\delta} \cdot V_{\delta}}{V_M} = \frac{B_{\delta} \cdot H_{\delta} \cdot S_{\delta} \cdot \delta}{l_M \cdot S_M} \quad (2.14)$$

kde	$V_{\delta} = S_{\delta} \cdot \delta$	objem ve vzduchové mezeře
	S_{δ}	plocha vzduchové mezery
	δ	vzduchová mezera
	V_M	objem magnetu
	l_M	délka magnetu
	S_M	plocha magnetu
	B_{δ}	magnetická indukce vzduchové mezery a
	H_{δ}	intenzita magnetického pole vzduchové mezery

Míra maximální potenciální energie magnetického pole v okolí magnetu (např. ve vzduchové mezeře):

$$W_{\delta\text{max}} = \frac{1}{2} V_M \cdot (BH)_{\text{max}} \quad (2.15)$$

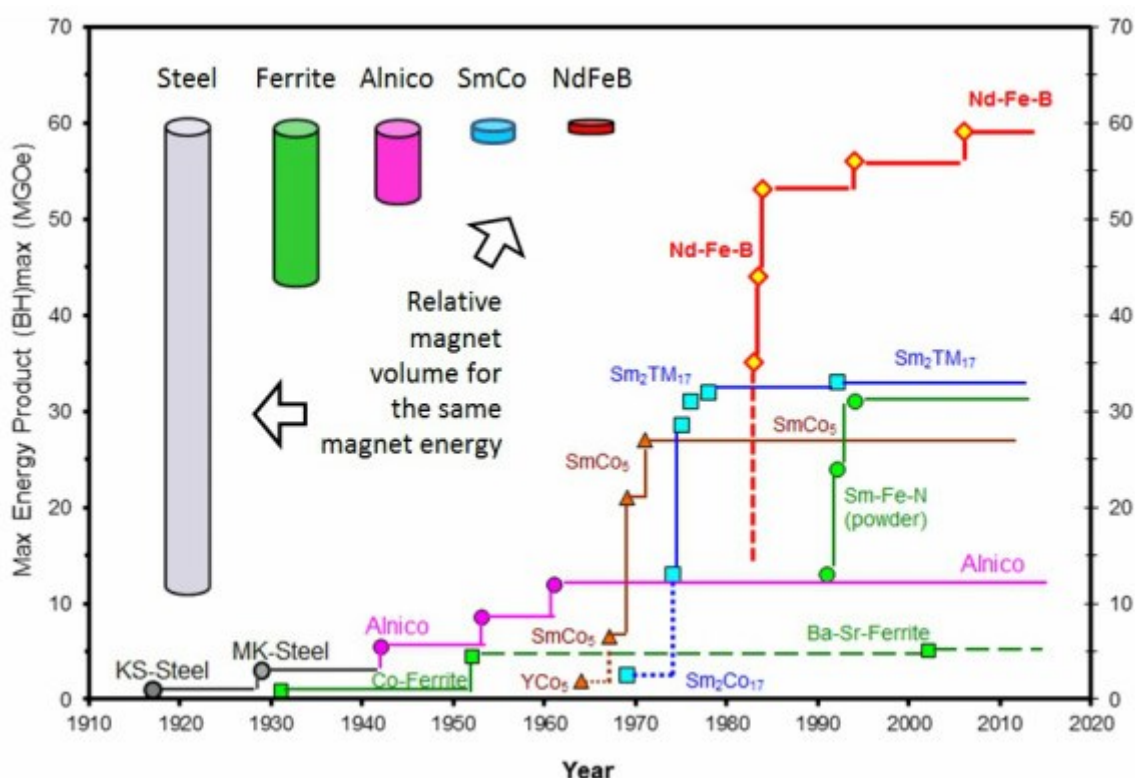
kde	V_M	objem magnetu
	$(BH)_{\text{max}}$	maximální energetický součin

Ze vztahu 2.15 je vidět, proč je $(BH)_{\text{max}}$ tak důležitou a sledovanou hodnotou PM. [2], [3], [4]

3. MATERIÁLY PERMANENTNÍCH MAGNETŮ, JEJICH VLASTNOSTI A POUŽITÍ

Jak již bylo zmíněno v kap. 2.6.2, pro vhodný návrh PM a výběr materiálu PM jsou nejlépe hodnotami B_r , H_c a $(BH)_{\max}$. Pro posouzení použití vhodných materiálů PM pro mnohé průmyslové aplikace z různých oborů technického prostředí, budou jednotlivé materiály PM, včetně jejich vlastností, popsány z historického hlediska podle vývoje od nejstarších po nejnovější v následujících podkapitolách.

Tento vývoj je zobrazen na obr. 3.1, kde je zohledněno hledisko dosažených $(BH)_{\max}$.



Obr. 3.1 Historický vývoj PM v závislosti na $(BH)_{\max}$ [5]

3.1. Materiály permanentních magnetů na bázi slitin

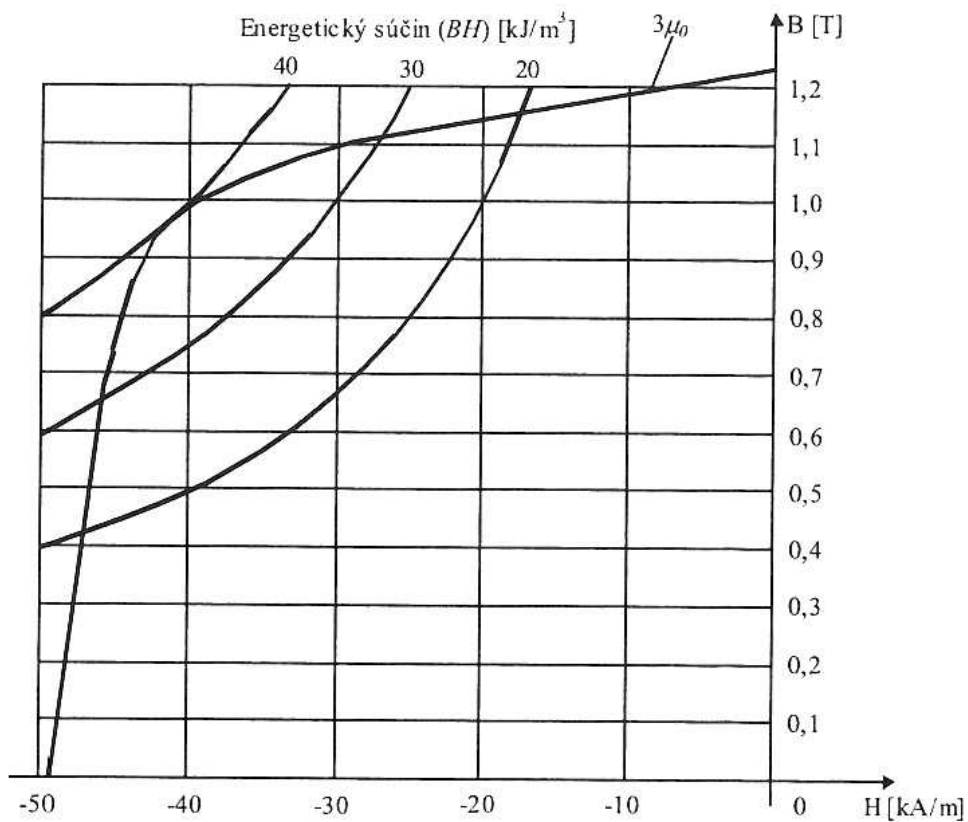
Na začátku 20. století byla nejčastěji používaným materiálem pro PM jednoduchá slitina 99 % železa a 1 % uhlíku, kterážto $(BH)_{\max}$ se pohyboval okolo $1,6 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$ a $H_c = 0,4 \text{ [kA} \cdot \text{m}^{-1}]$. Mnohem dražší ocel s 35 % příměsí kobaltu a malým množstvím chromu a wolframu měla $(BH)_{\max}$ asi $7,5 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$ a $H_c = 20 \text{ [kA} \cdot \text{m}^{-1}]$.

Jedním z milníků v historii PM byl rok 1931, kdy byl v Japonsku I. Mishimou objeven nový druh slitiny ze železa, niklu a hliníku. Přestože $(BH)_{\max}$ dosahoval ze začátku v těchto slitinách hodnot pouze asi $10 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$ a hodnota $H_c = 40 \text{ [kA} \cdot \text{m}^{-1}]$, později se zjistilo, že

lepších vlastností je dosaženo přidáním minimálně 12 % kobaltu (Co) do slitiny. Spojení značek těchto prvků pak dává název celé důležité skupiny slitin Alnico (Al-Ni-Co). Pro ukázkou zde uvedme přehled některých slitin Alnico s jejich magnetickými vlastnostmi (tab. 3.1). [2]

Tab. 3.1 Magnetické vlastnosti slitin Alnico [2]

Označení	Složení	B_r [T]	H_c [kA m ⁻¹]	$(BH)_{\max}$ [kJ m ⁻³]
Alni	Fe-Al-Ni-Cu	0,5 ÷ 0,7	32 ÷ 44	0,9 ÷ 1,4
Alnico	Fe-Al-Ni-Co-Cu	0,5 ÷ 1,4	44 ÷ 110	7 ÷ 34
Alnico 2	Fe-10Al-18Ni-13Co-5Cu	0,7	45	
Alnico 5	Fe-8Al-13Ni-24Co-3Cu	1,2	49	
Ticonal	Fe-Al-Ni-Co-Cu-Ti	0,7 ÷ 1,1	135 ÷ 155	24 ÷ 55
Alnico 9	Fe-8Al-15Ni-34Co-4Cu-5Ti	1,0	125	



Obr. 3.2 Demagnetizační křivka materiálu Alnico 5 [4]

Na obr. 3.2 je vidět demagnetizační křivka jedné ze slitin skupiny Alnico, konkrétně slitinu Alnico 5.

Magnetická tvrdost slitin Alnico je ovšem spojena s jejich velmi nevhodnými mechanickými vlastnostmi, jakými mohou být mechanická tvrdost a křehkost. Navíc se odlitky během chlazení srážejí, což vede k potřebě je brousit na požadovaný tvar a provést výslednou stabilizaci magnetu (kap. 2.7).

Shrňme, že slitiny Alnico se vyznačují poměrně vysokou remanencí $B_r = 1,2$ [T], nižší koercitivitou $H_c \cong 50$ [kA · m⁻¹], malým energetickým součinem $(BH)_{\max} = 40 \div 80$ [kJ · m⁻³] a z důvodu tvaru jejich demagnetizační křivky se sklonem $3\mu_0$ je nutná jejich stabilizace. [2], [4]

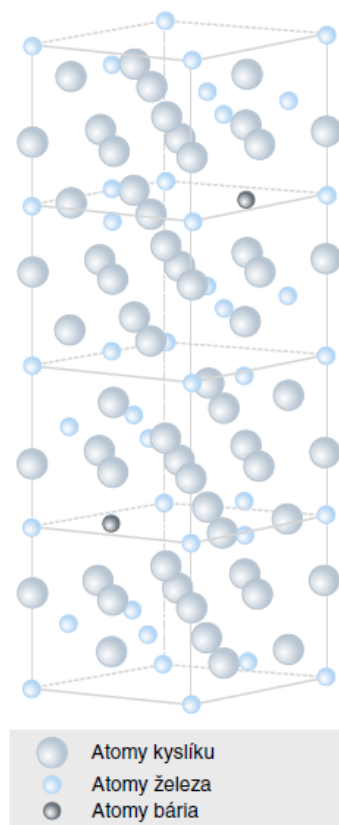
3.2. Feritové materiály permanentních magnetů

Feritové (keramické) materiály jsou oxidické materiály, jejichž název je odvozen z oxidu železitého Fe_2O_3 . Jejich obecný chemický vzorec je $MeO \cdot Fe_2O_3$, respektive $MeO \cdot 6(Fe_2O_3)$, přičemž Me mohou být prvky jako Cd, Mg, Zn, Cu, Mn, Fe, Co, Ni, Ba, Sr, Pb a další.

Ferity se dělí dle svých vlastností do několika skupin, jmenujme například, magneticky měkké ferity (MMF), magneticky tvrdé ferity (MTF), ferity s pravoúhlou hysterezní smyčkou, aj. Prakticky všechny feritové materiály se používají v různých odvětvích elektrotechniky, převážně však v aplikacích vysokofrekvenční elektrotechniky, radiotechnice, radioelektronice, mikrovlnné a výpočetní technice. V oblasti elektroenergetiky, převážně v aplikacích spjatými s ES (PM, rotory, statory, aj.) našla uplatnění v podstatě jediná skupina feritů, kterou jsou MTF. Pro tuto skupinu feritů jsou základními požadavky vysoká $H_c \sim 150 \div 250$ [kA · m⁻¹], nižší $B_r \sim 0,38$ [T] a poměrně vysoká rezistivita $\rho \sim 10^9$ [$\Omega \cdot \text{cm}$]. [2]

3.2.1. Výroba magneticky tvrdých feritů

MTF jsou vyráběny práškovou metodou, kdy nejčastějšími sloučeninami, vstupujícími do procesu jsou prášky oxidů Fe (Fe_2O_3) a uhličitany Ba nebo Sr ($BaCO_3$ resp. $SrCO_3$) v poměru přibližně 80 % Fe_2O_3 a 20 % $BaCO_3$ ($SrCO_3$) a z této směsi kalcinací (očištěním a následným vytvořením prvotní slitiny) za vysokých teplot ($1200 \div 1300$ °C) vzniká hexaferit (obr. 3.3). Tento ferit se posléze drtí na zrna velikosti $1 \sim 2$ μm a následuje proces lisování do požadovaných tvarů, a to buď za sucha, ve formě prášku s pojivem, nebo mokrou cestou, tedy ve formě vodní suspenze. Získaný kompak získá svůj konečný tvar a pevnost sintrováním (spékáním) při teplotách přesahujících 1200 °C po dobu dvou hodin, přičemž se srazí asi o 15 %. Obrábění feritů je díky jejich velké tvrdosti a křehkosti značně obtížné, použitelné je proto jen broušení diamantovým nářadím, případně ultrazvukové obrábění. Výroba práškovou technologií však zaručuje přené tvary i dobrou jakost povrchu, takže proces konečného obrábění často nebývá nutný. Schéma výrobního procesu je zobrazena na obr 3.4.



Obr. 3.3 Krystalografická buňka krystalu $BaFe_{12}O_{19}$ [3]

Je vhodné zmínit, že feritové magnety mohou být cestou práškové metalurgie vyráběny anizotropní, nebo izotropní.

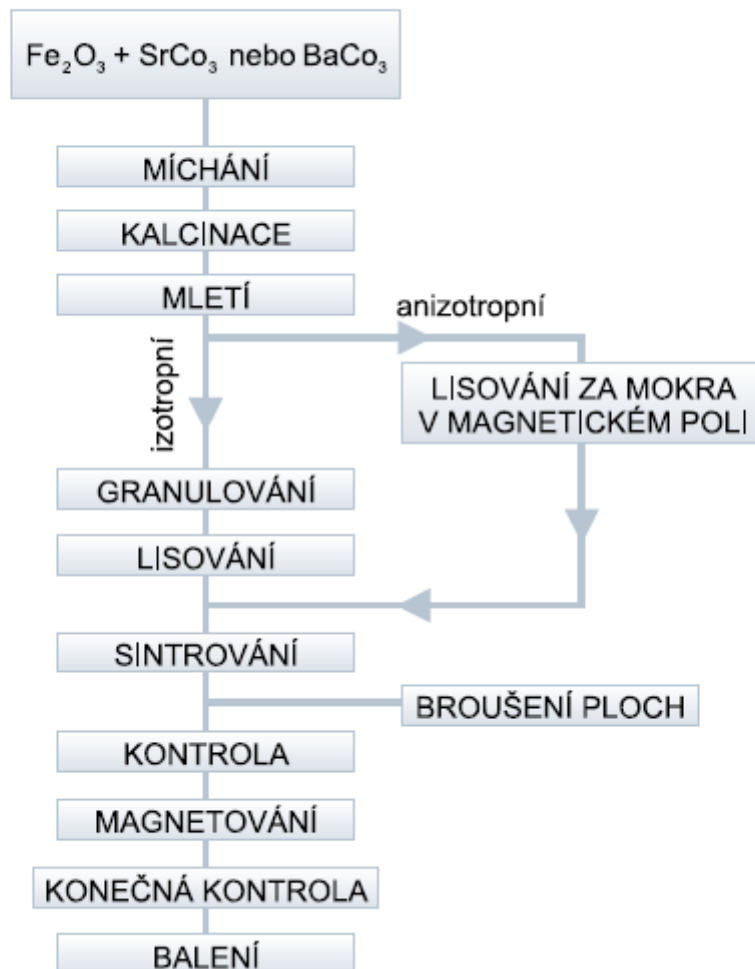
Anizotropní magnety:

Mají dobré magnetické vlastnosti pouze v jednom směru, a to v tzv. přednostní ose magnetizace. Jsou lisovány v určitém magnetickém poli a právě tímto dostanou prioritní směr magnetování, to znamená, že mohou být v budoucnu magnetovány pouze v této prioritní ose. U anizotropních magnetů je prioritní směr magnetování totožný se směrem orientace magnetizace.

Izotropní magnety:

Oproti magnetům izotropním mají stejné magnetické vlastnosti prakticky ve všech směrech. Vyrábí se z izotropních materiálů, jsou lisovány bez přítomnosti magnetického pole a z toho vyplývají četné možnosti magnetování. Tím, že tyto magnety nemají žádnou přednostní osu magnetizace, mohou být tedy podle potřeby namagnetovány v jedné ze tří os. Ve srovnání s anizotropními PM jsou cenově výhodnější.

Blokové schéma výrobního procesu feritových magnetů.



Obr. 3.4 Blokové schéma výrobního procesu feritových magnetů [3]

Sklon demagnetizační křivky některých feritů může dosáhnout okolo $1,05 \mu_0$, což je velmi blízko sklonu $\mu_0 = 1$, jež má ideální PM. Z tohoto důvodu není třeba takovýto feritový materiál stabilizovat, neboť reverzibilní přímka je téměř shodná s demagnetizační křivkou, což je velká výhoda. [2], [3], [4]

3.3. Materiály PM ze vzácných zemin

3.3.1. Vývoj PM ze vzácných zemin

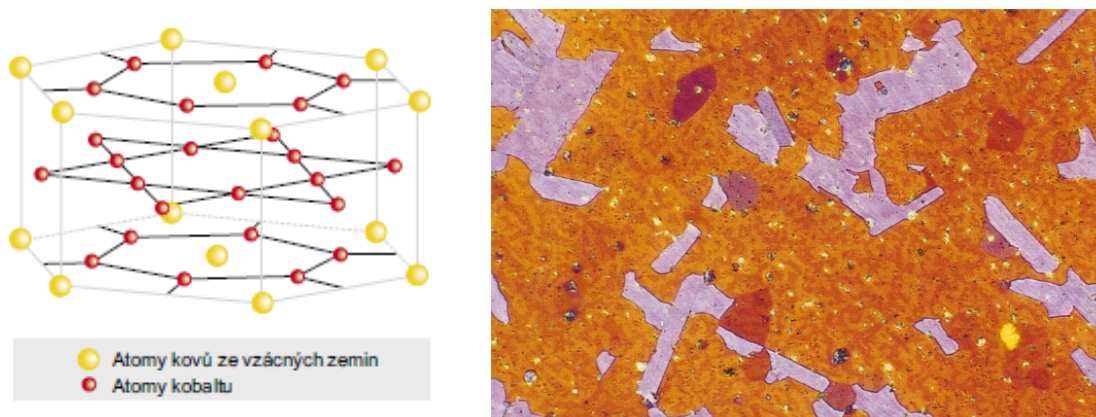
V 60. letech 20. století byl vyvinut nový druh materiálu PM, který spojuje, či dokonce převyšuje všechny výhody výše popsaných PM, dnes známý jako PM ze vzácných zemin. Jak již samotný název napovídá, tyto materiály jsou založeny na intermetalických sloučeninách z kovů vzácných zemin, nejčastěji lanthanoidů Sm, Nd, Pr atd. (někdy označované jako R z

angl. rare-earth), spolu s přechodovými kovy (TM z angl.. transition metal) jako Fe, Co nebo Ni. Tyto PM mají výrazně vyšší hodnoty H_c , B_r a $(BH)_{\max}$ než do té doby osvědčené a používané PM Ocel, Alnico a ferity. Jednou z nejpoužívanějších je sloučenina Sm-Co, a to v poměru 1:5, případně 2:17. Tyto magnety roku 1982 doplnil zásadní a dnes hojně rozšířený druh PM na bázi NdFeB, nejčastěji v poměru 2:14:1 či 15:77:8. [2], [3]

3.3.2. Permanentní magnety na bázi samarium – kobalt

3.3.2.1. Krystalografická buňka krystalu $SmCo_5$

Tato krystalová struktura představuje základní jednotku veškerých PM ze vzácných zemin s přechodovým kovem (obr. 3.5a). Z této mohou být odvozeny jak struktury Sm_2Co_{17} , tak $Nd_2Fe_{14}B$.

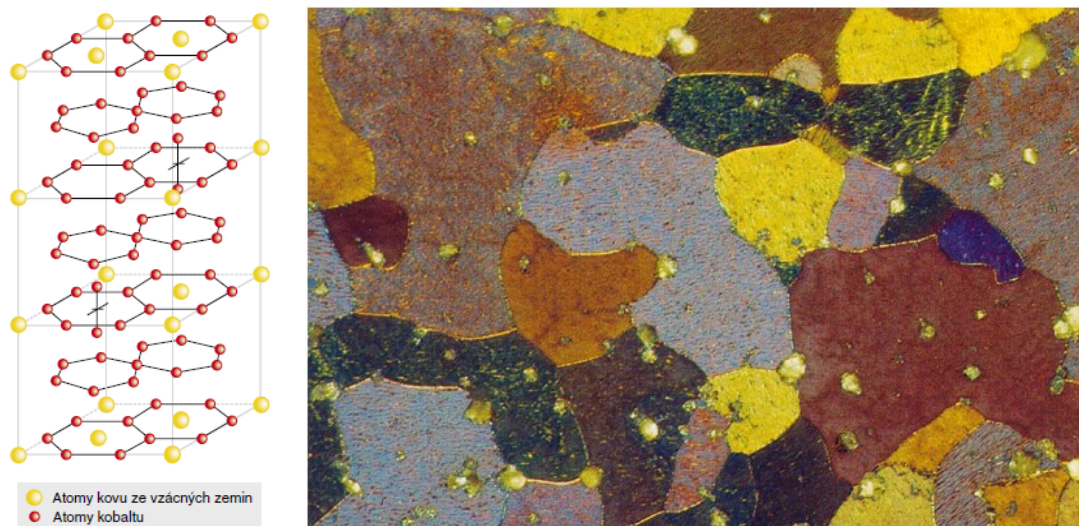


Obr. 3.5 a) krystalografická buňka krystalu $SmCo_5$, b) struktura $SmCo_5$ (1000x zvětšeno) [3]

Strukturní stavba (obr. 3.5b) znázorňuje v podstatě dvě rozdílné fáze. Jsou to Sm_2Co_7 (fialová) a magneticky tvrdá fáze $SmCo_5$ (hnědá). Tyto permanentní magnety jsou „nukleárně vytvrzené“, tzn., že magnetická tvrdost vzniká v podstatě vysokou anizotropní silou pole.

3.3.2.2. Krystalografická buňka krystalu Sm_2Co_{17} a mikrostruktura

Tato krystalická buňka tvoří výchozí strukturu pro PM $Sm_2(TM)_{17}$ a je založena na jednopětinové buňce krystalické mřížky (obr. 3.6a). Přitom je tam nahrazována třetina všech atomů Sm páry atomů Co.



Obr. 3.6 a) krystalografická buňka krystalu Sm_2Co_{17} , b) struktura Sm_2Co_{17} (1000x zvětšeno) [3]

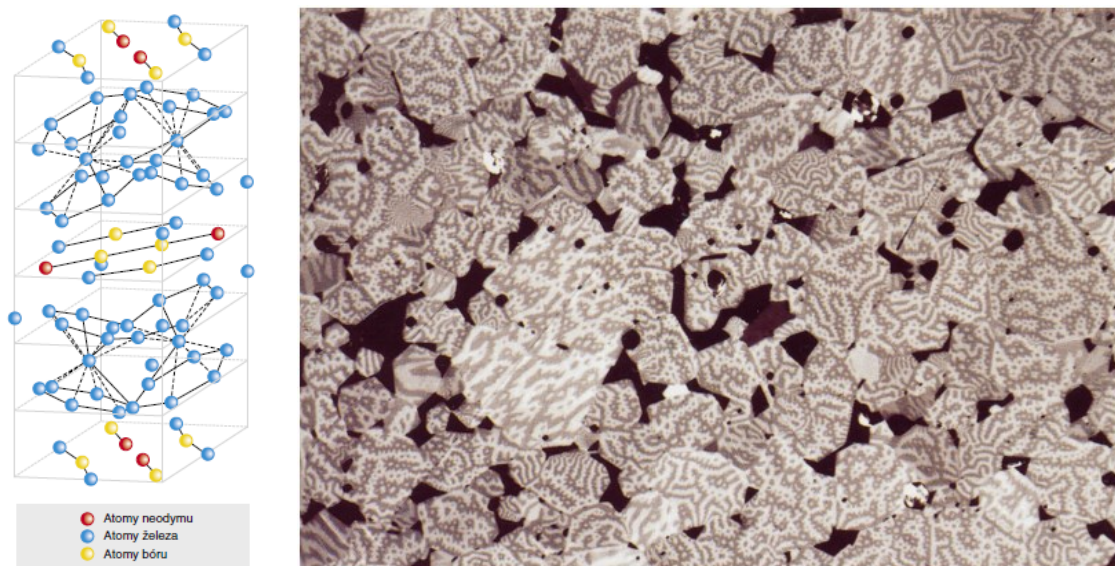
Struktura (obr. 3.6b) je tvořena v podstatě magneticky tvrdou fází Sm_2Co_{17} (barevná). Různé barvy vznikají leptáním. Mezi zrnky lze poznat jemnou zrnitou mezní fázi jiného složení (světlá). Největší částice jsou karbidy Zr. Tyto magnety jsou oproti jiným materiálům ze vzácných zemin „vytvrzené vyloučeninou“, tzn., že magnetické elementární oblasti jsou omezeny nepatrnými, v optimálním výbrusu neviditelnými vyloučeninami ve fázi Sm_2Co_{17} při přenosu. Toto vysvětluje pomalou reakci při namagnetování a přemagnetování. [3]

3.3.3. Permanentní magnety na bázi neodym – železo – bor

Jak je patrné z obr. 3.1, tento typ PM byl z dnešních nejpoužívanějších PM objeven jako poslední v řadě PM, konkrétně v roce 1982, nezávisle na sobě Dr. Magato Sagawou a Dr. Johnem Croatem. [6]. Při pokojové teplotě má tento materiál PM největší energetický součin ze všech komerčně vyráběných magnetů a sice $(BH)_{\max} \geq 250 \text{ [kJ} \cdot \text{m}^{-3}]$. Současně vysoká $B_r \sim 1,2 \text{ [T]}$ a vysoká $H_c \sim 800 \text{ [kA} \cdot \text{m}^{-1}]$ umožňuje výrazné snížení velikosti magnetu v porovnání s feritovými PM, pro stejný výkon aplikace (např. EM).

3.3.3.1. Krystalografická buňka krystalu $Nd_2Fe_{14}B$ a mikrostruktura

Tato buňka, sestávající ze čtyř podjednotek tvořících jednotkovou buňku, obsahuje 68 atomů (obr. 3.7a). Do PM $NdFeB$ jsou přidávány další legující prvky, např. částečné nahrazení Nd Dy vede ke zvýšení koercitivní síle pole. Přednostní osa magnetizace je rovnoběžná k ose c, a tím kolmá k základní rovině.



Obr. 3.7 a) krystalografická buňka krystalu $Nd_2Fe_{14}B$, b) struktura $Nd_2Fe_{14}B$ (1000x zvětšeno) [3]

Struktura je tvořena v podstatě dvěma rozdílnými fázemi. To jsou magneticky tvrdé fáze $Nd_2Fe_{14}B$ (s doménovou strukturou) a nemagnetické zrnité mezní fáze z prakticky čistého neodymu (černá). Tyto PM jsou rovněž „nukleárně vytvrzené“, tzn., že magnetická tvrdost vzniká v podstatě vysokou silou anizotropního pole. Přemagnetování začíná jak na příměsích, tak na povrchu zrna (obr. 3.7b). [2], [3], [4]

3.3.4. Vlastnosti a význam PM ze vzácných zemin

Obecně lze konstatovat, že PM ze vzácných zemin vykazují nejlepší magnetické vlastnosti ze všech komerčně využívaných materiálů PM. Pro jejich použití hraje jednoznačně jejich nejvyšší hodnoty B_r , H_c a $(BH)_{max}$, největší nevýhodou je jejich vysoká cena, přestože postupně klesá. Za vysokou cenou PM stojí zejména vysoká cena výrobních surovin, ale rovněž technologie zpracování je velmi náročná. Úprava magnetů do správného tvaru vyžaduje asi 50 % ceny, další zvýšení cen kobaltu na světovém trhu pak zvýšilo cenu SmCo o dalších 15 %. Cena neodymu je zase vysoká kvůli těžkosti oddělení od jeho rudy.

PM ze vzácných zemin se kvůli jejich tvrdosti opracovávají diamantovým nářadím, přičemž nejvyšší křehkost vykazuje Sm_2Co_{17} . Při nárazech může lehce dojít k odštípnutí povrchové vrstvy, přesto jsou způsoby opracování jako broušení, elektro-eroze nebo řezání vodním paprskem možné. Mechanické vlastnosti spojených plastem, jsou v podstatě určovány použitým plastem. Oproti sintrovaným magnetům ze vzácných zemin je u magnetů spojených plastem možné opracování jako soustružení, frézování a vrtání, a to tvrdokovovým nářadím.

Pokroky ve vývoji materiály zlepšily doposud značně silnou náchylnost ke korozi magnetů NdFeB, takže za normálních podmínek použití mohou být určité materiály z této skupiny nasazeny, aniž by byla nutná dodatečná povrchová úprava.

Trvalé magnety na bázi kovů vzácných zemin mají řadu využití v aplikacích, kde je potřeba vyvinout silnou magnetickou interakci (přidržnou sílu) nebo tam, kde záleží na malých rozměrech. Jsou to např. rotory a statory motorů, lineární motory, magnetické spojky a brzdy, magnetické polarizátory tekutin, magnetické separátory, systémy proti zlodějům v obchodech. Dále se magnety ze vzácných zemin používají např. v těchto oblastech: automaty a roboty, automobily, hračky, kuchyňské stroje, pračky, myčky, náramkové hodinky, výpočetní technika apod. [2], [3], [4]

3.4. Magnetizování PM

Po výrobě jsou PM v zásadě v nezmagnetizovaném stavu. Před použitím se musí PM vystavit působení značně silného vnějšího magnetického pole. Tento krok se nazývá magnetizování PM.

Zmagnetizování nastane téměř okamžitě po přiložení dostatečně velkého magnetického pole na PM. Magnet, případně magnetický obvod, který má být zmagnetizovaný se umístí do cívky, kterou se nechá protéct krátký impuls velmi vysokého proudu, který se získá vybitím sady kondenzátorů přes cívku.

Záleží na konkrétní aplikaci, jestli se PM zmagnetizuje před montáží, nebo až po montáži na místě použití. V aplikacích, kde přímka zátěže odpovídající konečné montáži je mnohem strmější než ta, která odpovídá volnému magnetu, je magnetizace jediný způsob, jak dosáhnout navrhované hodnoty obvodu. Na druhé straně návrh montáže mnohých magnetů je takový, že zmagnetizování na místě je nemožné, např. tehdy, když montáž zahrnuje magnetové bloky, které jsou blízko sebe a mají být magnetizované v opačných směrech. Magnetizování na místě často vyžaduje speciální cívky a šablony, které mohou být dané. Materiály PM, kterých demagnetizační charakteristika je přímka, mohou být předmagnetizované, protože reverzibilní přímka leží blízko demagnetizační charakteristice.

Je však potřeba zdůraznit, že velké bloky předmagnetizovaných PM můžou neočekávaně vytvořit velké síly v průběhu montáže. Pokud se nevypracuje detailní postup, při montáži může dojít i k poranění osob, případně ke zničení jednotlivých částí zařízení. Zvláštní pozornost si vyžaduje doprava zmagnetizovaného materiálu, protože pokud jsou vystavené mechanickému nebo tepelnému působení, může to podstatně změnit jejich charakteristické hodnoty.

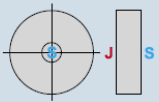

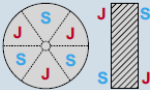
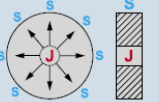
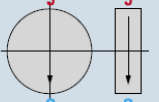
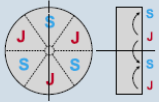
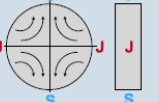
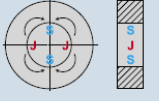

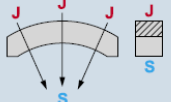
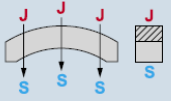
Tab. 3.2 Doporučené hodnoty H na zabezpečení 100 % magnetizace materiálu PM [4]

Materiál PM	H [kA/m]
Alnico	300-500
Ferit	800
Nd-Fe-B	2500
Sm-Co	2000-3500

Na úplnou magnetizaci PM, hlavně těch, které mají vysokou koercitivní sílu, je potřebná velmi vysoká intenzita vnějšího magnetického pole H . V tab. 3.2 je přehled doporučených hodnot H v $[kA \cdot m^{-1}]$ na zabezpečení 100 % magnetizace pro různé typy PM.

Jak bylo zmíněno v kap. 3.2.1, v průběhu lisování je možné materiál (prach) vystavit silnému vnějšímu magnetickému poli, čímž v PM vzniká tzv. přednostní osa orientace. Tou se rozumí uspořádání magnetických krystalů do určitého směru. V této přednostní ose orientace dosahuje PM svých nejlepších magnetických parametrů, musí však být magnetován v této ose magnetován. Magnety kruhové a válcové mají osu orientace většinou axiální, u hranolů prochází výškou a u segmentů se jedná o osu diametrální nebo radiální. [2], [3], [4]

Přehled všech způsobů magnetování PM, včetně jejich použití je uveden na obr. 3.8.

MOŽNOSTI MAGNETOVÁNÍ	PŘÍKLADY POUŽITÍ	MATERIÁL
	axiální	reproduktory, různé upínací systémy, spínače a kontakty, filtry atd
	promagnetování kolmo na největší plochu	filtrační systémy, upínací desky, upínací systémy s pólovými nástavci, filtry atd.
	axiální sektorové promagnetování např. 6- pól	synchronní motory, čelní spojky
	radiální	zdvihové magnety, upínací systémy (aplikace není možná u všech rozměrů)
	diametrální	synchronní motory, systémy s jádrem atd.
	sektorové laterální na jedné ploše např. 6- pól	čelní spojky, přidržovací systémy
	vícépólové laterální na obvodu např.6- pól	dynama, motory, vnitřní části spojek atd.
	vícépólové laterální na vnitřním průměru např.4- pól	motory, vnější části spojek atd.
	pruhové laterální na jedné ploše (P = vzdálenost pólů)	přidržovací systémy
	radiální	motory
	diametrální	motory
<p>U axiálně promagnetovaných magnetů lze na přání označit severní a jižní pól zhloubením nebo barvou. U laterálního (jednostranného) magnetování lze na přání označit magnetickou stranu.</p>		

Obr. 3.8 Možnosti magnetování PM [3]

3.5. Použití PM

Materiály PM mají vysokou koercitivní sílu. Proto se s velkými výhodami používají v elektrických strojích (viz kap. 3.6), u magnetických separátorů, v zařízení dopravníků či v automobilových pomocných zařízeních, jakými mohou být nízko-výkonové a nízko-nákladové motory.

Použití jednotlivých materiálů samozřejmě závisí od potřeb na jejich přesnost, výkon, velikost, hmotnost a v neposlední řadě cenu.

Porovnání cen magnetů z údajů výrobce magnetů Philips Components Ltd. Vidíme v tab. 3.3.

Tab. 3.3 Ilustrační porovnání cen magnetů výrobce Philips Components Ltd. [4]

RES 278 ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$)	RES 190 (SmCo_5)	Ferit FXD 380 ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$)
100 %	175 %	3,3 %

Z tab. 3.3 lze vidět poměry cen 3 PM, vztaženou k $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Pokud 1 gram PM vyrobeného z $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ považujeme za 100 %, potom 1 gram SmCo_5 má hodnotu 175 % ceny $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ a gram feritu cenu odpovídající pouhým 3,3 % této ceny. Z výše uvedeného můžeme konstatovat, že přestože komplexně nejlepších vlastností v porovnání cena/výkon dosahují magnety NdFeB , nemohou konkurovat velmi levným feritovým magnetům, které jsou vyráběné z levných nestrategických surovin, a přitom mají dostatečně vysokou H_c kombinovanou s rozumnou B_r .

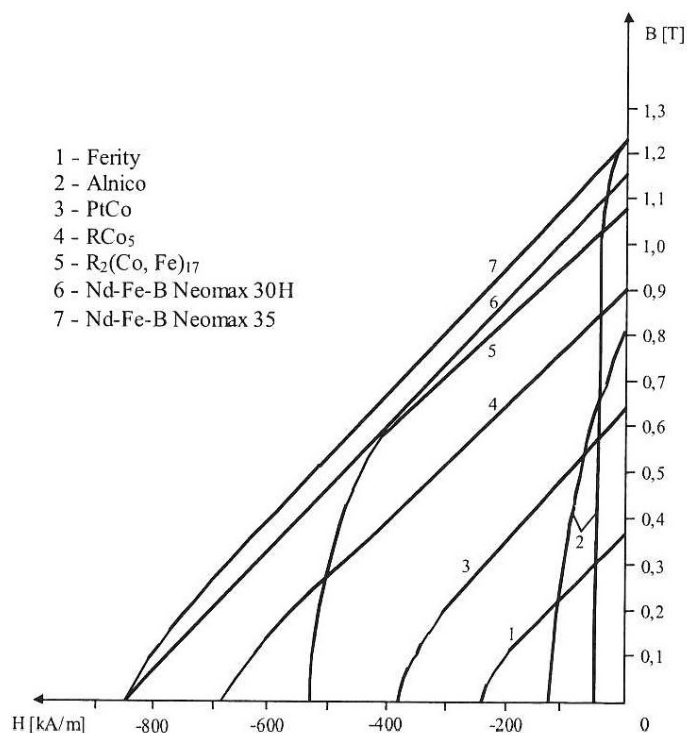
PM NdFeB se používají v případech, kdy je zapotřebí z důvodu velikosti nebo hmotnosti motoru dosáhnout dostatečných magnetických vlastností, kterých by feritové magnety při těchto objemech nedosáhly.

Nad určitou velikost motorů se už nepoužívají feritové magnety, nýbrž elektromagnety. Použití magnetů NdFeB je běžné v oblasti právě mezi těmito dvěma typy magnetů.

Současnou výrobu PM na světovém trhu můžeme charakterizovat přibližně takto: asi 20% veškerých PM se vyrábí v Evropě, dalšími důležitými výrobci jsou USA a Japonsko a poslední dobou velmi stoupá výroba PM v Číně, která začíná hrát prim zejména s PM ze vzácných zemin.

Magnetické vlastnosti B_r a H_c různých druhů PM, které jsou jedněmi z nejdůležitějších parametrů pro jejich použití v mnohých aplikacích, jsou pro ilustraci uvedeny v následujícím grafu (obr. 3.9).

Z hlediska jednotlivých druhů magnetů, z celkového množství vyrobených PM, zhruba 55 % celkové hmotnosti jsou ferity, 10 % Alnico a 35 % tvoří PM ze vzácných zemin. Jak je vidět, magnety Alnico se používají velmi málo a odhaduje se, že jejich použití bude dále klesat. Zpravidla výrobci motorů buď používají ferity pro levnější motory, nebo NdFeB pro speciální motory. [4]



Obr. 3.9 Demagnetizační křivky průmyslově vyráběných PM [4]

3.6. Použití PM v elektrických strojích

Všechny výše uvedené kapitoly jsou základními předpoklady pro výběr PM pro různé druhy aplikací. Pro oblast elektroenergetiky je nejdůležitější použití PM v ES.

Motory s buzením PM mají v porovnání s klasickým buzením cívkami několik výhod, avšak nutně musí i jisté nevýhody. Základní přehled těchto výhod a nevýhod je zhruba následující:

Výhody:

- Chybí budící vinutí
- Nevytváří ztráty ve vinutí
- Menší objem a větší kompaktnost
- Menší hmotnost
- Větší spolehlivost
- Větší účinnost
- Delší životnost
- Velká momentová přetížitelnost

Nevýhody:

- Složitá konstrukce
- Vysoká cena
- Použití limitované velikostí stroje

Můžeme konstatovat, je prakticky jediným nákladem na PM je jejich počáteční cena, která se v závislosti na druhu PM může výrazně lišit, přičemž nejlevnější jsou feritové a nejdražší SmCo PM, nejvýhodnějšími jsou pak PM na bázi NdFeB.

Pro dosažení co největších měrných momentů stroje, jakožto jednoho z hlavních faktorů rozhodujících o výběru vhodného PM, je potřeba dosažení co největšího magnetického a elektrického využití stroje.

Elektrické zatížení stroje je omezené tepelno-ventilačními poměry stroje, kdy je třeba odvést ztráty vytvořené ve stroji, a dále demagnetizačním účinkem, kterým reakce kotvy působí na magnet. PM tedy musí být charakterizován vysokou H_c a dostatečnou délkou ve směru magnetizace, čímž je možno předejít demagnetizaci PM.

Magnetické zatížení, charakterizované magnetickým tokem ve vzduchové mezeře, resp. jeho indukcí B_δ , je přímo úměrné B_r a ploše pólového nástavce PM.

Z toho vyplývá, že vysoký měrný moment stroje vyžaduje největší možný objem magnetu, tedy jeho délku krát plochu pólu.

V případě keramických magnetů je možné pozorovat omezení jejich objemu, a to často omezením geometrického objemu rotoru samého, to znamená, že pro dosažení potřebného měrného momentu by objem feritu nabyt větších rozměrů, než je možný objem rotoru. Z toho vyplývá, že s tímto druhem PM nelze dosáhnout vysokých výkonů strojů. Materiálem splňujícím tyto podmínky je PM ze vzácných zemin, kde na druhou stranu může být oním omezujícím faktorem jeho cena.

Magnetická indukce vzduchové mezery B_δ u střídavých strojů je omezená nasycením statorových zubů. Přílišné nasycení znamená sníženou magnetickou vodivost, která vede k absorpci přílišného magnetického napětí, které vyžaduje neúměrný nárůst objemu magnetu, následkem čehož způsobuje přílišné přehřátí vlivem ztrát v železe. Z tohoto důvodu existuje horní limit použitelné energie PM.

Do budoucna je v tomto ohledu velmi důležitý výzkum a vývoj v této oblasti, který by měl za následek vyvinutí magnetických materiálů s dostačujícími vhodnými vlastnostmi a zároveň nízkou cenou. Přestože vynález magnetu NdFeB udělal ve vývoji PM jistý pokrok, stále se čeká na dlouho očekávaný materiál s vlastnostmi SmCo PM a cenou feritů. [2], [4]

4. SYNCHRONNÍ STROJE

4.1. Použití synchronních strojů

Synchronní stroje (SS) podle jejich funkce rozdělujeme na synchronní generátory, synchronní motory a synchronní kompenzátory. SS jsou vyráběny ve velkém rozsahu výkonů, od zlomků wattů do stovek MW, přičemž hraniční výkon strojů je dnes 2000 MW.

SS dále řadíme do kategorie střídavých točivých strojů, kde kmitočet jejich svorkového napětí je přímo úměrný otáčkám a počtu pólových dvojic. Nejčastěji se používají jako měniče mechanické energie na energii elektrickou, tedy jako trojfázové alternátory, které jsou prakticky výhradním zdrojem výroby elektrické energie a patří k největším ES vůbec.

Napětí statorového vinutí bývá až 35 kV.

Alternátory se z hlediska konstrukčního provedení dále dělí na turboalternátory a hydroalternátory.

Turboalternátory – mívají malý průměr a značkou délku, povětšinou vyráběné jako dvoupólové nebo čtyřpólové. Používají se v tepelných a jaderných elektrárnách, kde jsou poháněny parní turbínou. Pracují při jmenovitých otáčkách stovek až $3000 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Hydroalternátory – jsou určeny především pro vodní elektrárny. Na rozdíl od turboalternátorů se jedná o mnohápólové stroje velkého průměru a malé délky. Jejich otáčky jsou určeny typem turbíny (Francisova, Kaplanova) a dosahují rychlosti v rozmezí $\sim 50 \div 500 \text{ ot} \cdot \text{min}^{-1}$.

Důležitým faktorem alternátorů je skutečnost, že nejsou pouze zdrojem činné, ale také jalové energie. Proto se jich někdy užívá jako kompenzátorů jalové energie v sítích. Takto pracující SS, který je připojen k síti, z ní odebírá činnou energii na krytí svých ztrát a naopak do sítě dodává jalovou energii, se nazývá synchronní kompenzátor.

Hojně používanými jsou také synchronní motory. Jejich výhodou jsou konstantní otáčky, vhodné možnosti regulace účinníku a dobrá účinnost. V současné době jsou nejvíce využívány pro pohony kompresorů a ve střídavých regulačních pohonech.

Velmi rozšířené jsou také malé synchronní motorky pro pohon hodin, zapisovačů, magnetofonů, apod. [7]

4.2. Konstrukce synchronních strojů

Jako u všech točivých strojů, také SS se skládá ze dvou základních částí, a to statoru a rotoru. Obvyklé uspořádání u SS je takové, že střídavé vinutí je uloženo na statoru.

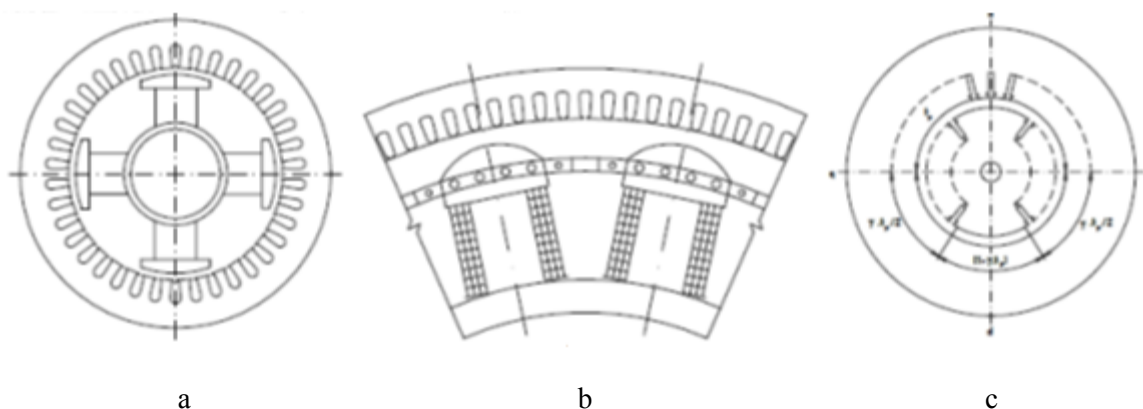
Stator – statická část SS. Magnetický obvod je složen z plechů, v jejichž drážkách je uloženo vinutí.

Rotor – rotační (pohyblivá) část SS. Po jeho obvodu jsou pravidelně rozloženy póly s pólovými nástavci, buzenými stejnosměrným proudem, případně PM. Podle provedení rotoru dělíme dva základní druhy SS:

- SS s vyniklými póly
- SS s hladkým rotorem

Schéma stroje s vyniklými póly je zobrazen na obr. 4.1a. Budící vinutí je tvořeno cívkami, které jsou nasunuty na jádrech pólů (obr. 4.1b). Póly s pólovými nástavci jsou pravidelně rozloženy po obvodu rotory (magnetového kola). Magnetové kolo je buď z oceli, nebo složeno z ocelových plechů. Budící vinutí je napájeno stejnosměrným proudem přes dva kroužky. Zdrojem stejnosměrného proudu se poslední dobou stávají tyristorové měniče, umístěné přímo na rotoru, čímž je odstraněn kluzný kontakt kartáč – kroužek. Využívají se coby hydroalternátory ve vodních elektrárnách.

Stroje s hladkým rotorem, užívané jako turboalternátory, si díky velké rychlosti a velkým rozměrům těchto strojů vyžadují rotor z oceli velké pevnosti. Budící vinutí je uloženo v drážkách rotoru, jež jsou zpravidla na $2/3$ obvodu a $1/3$ obvodu je bez drážek, v některých aplikacích se však využívá také možnost vydrážkování celého rotoru (obr. 4.1c).



Obr. 4.1 a) Stroj s vyniklými póly, b) Budící cívky nasunuty na jádrech pólů, c) Stroj s hladkým rotorem [7]

Synchronní stroj může být uspořádán také obráceně, tedy s magnety na statoru a vinutím na rotoru, toto se však provádí pouze u malých strojů. Jelikož synchronní generátory bývají převážně na vysoké napětí ($6 \div 35 \text{ kV}$), je výhodnější použití dříve popsaného uspořádání.

Podle způsobu chlazení můžeme SS rozdělit na stroje chlazené vzduchem, vodou a vodíkem, případně jejich kombinacemi. Druh chlazení se pak volí podle velikosti stroje a velikosti ztrát.

Je vhodné si uvědomit, že použití synchronních strojů, ať již motorů či generátorů, určují krom konstrukčních parametrů také parametry získané měření, výpočtem, či vzájemnou kombinací a ověření si správnosti jednotlivých výsledků jejich kombinací. V synchronních

strojích, podobně jako ve všech jiných ES, určujeme mnoho pracovních stavů, potažmo krajních stavů, na které je důležité ES dimenzovat, případně dle kterých se vybírá jejich použití do vhodných aplikací. Mezi ty nejzásadnější jmenujme především:

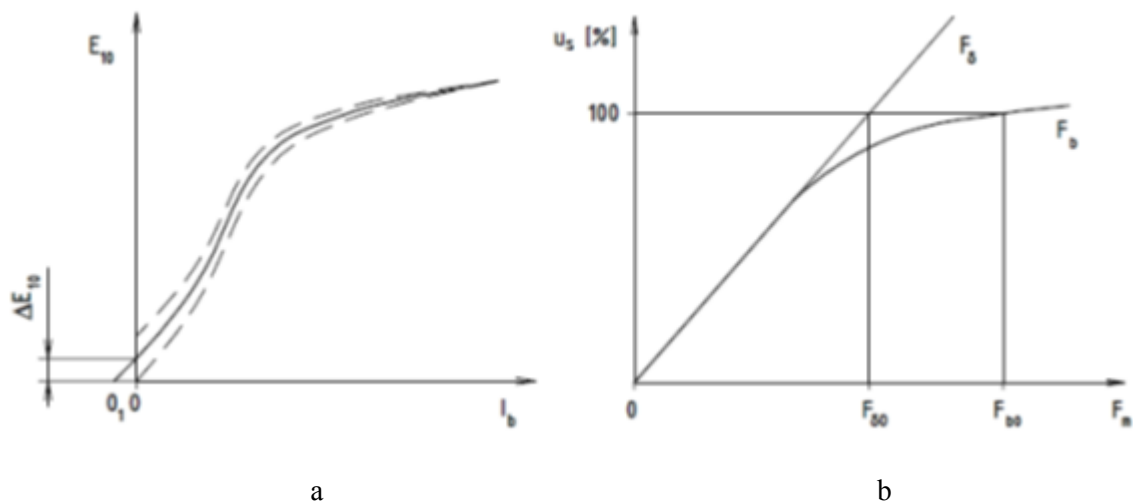
- Chod naprázdno
- Chod nakrátko
- Přifázování na síť
- Paralelní chod alternátoru

Další velmi důležitou, neřku-li nejdůležitější věcí pro samotnou konstrukci všech ES je určování parametrů náhlých zkratů, které se mohou v provozu objevit a na které se musí stroje konstruovat. Hodnoty těchto parametrů je možné získat výpočtem a rovněž pomocí měření, které ověří teoretické předpoklady v praxi. Pro výše uvedené stavy uveďme alespoň jejich základní charakteristiky a důvody určování. [7]

4.3. Charakteristika naprázdno

Charakteristika naprázdno synchronního stroje je závislost svorkového napětí U_1 na budícím proudu I_b nebo budícím magnetickém napětí F_m při proudu statoru $I_1 = 0$ a při jmenovitých otáčkách rotoru. Tato charakteristika vyjadřuje magnetické vlastnosti stroje. Jestliže zjišťujeme tuto charakteristiku měřením, pak se jedná o závislost statorového napětí (obvykle sruženého) na budícím proudu (v případě SS s PM na otáčkách). Jestliže proud buzení nejdříve zvyšujeme a pak snižujeme, dostaneme hysterezní smyčku. Charakteristika naprázdno je pak střední čára (obr. 4.2a).

Při výpočtech se charakteristika naprázdno udává jako závislost sruženého statorového napětí na budícím magnetickém napětí (obr. 4.2b), tedy při zanedbání stoupající a klesající větve.



Obr. 4.2 a) Charakteristika naprázdno zjištěná měřením,
 b) Charakteristika naprázdno zjištěná výpočtem [7]

Přímková část charakteristiky naprázdno vyobrazena na obr. 4.2a se nazývá charakteristikou vzduchové mezery, nebo také charakteristikou nasyceného zdroje. Je to část charakteristiky v rozsahu $0 \div 40$ (60) %. Závislost budicího magnetického napětí na skutečné magnetické indukci ve vzduchové mezeře udává vztah:

$$F_{\delta} = \frac{B_{\delta} \delta k_c}{\mu_0} \quad (4.1)$$

kde	B_{δ}	magnetická indukce ve vzduchové mezeře
	δ	vzduchová mezera
	k_c	Carterův činitel, zahrnující vliv drážkování statoru a rotoru
	μ_0	permeabilita vakua

Jak ukazuje obr. 4.2b, při zanedbání remanentního napětí, je tato závislost lineární. [7]

4.4. Charakteristika nakrátko

Charakteristika nakrátko je závislost statorového proudu I_1 na budícím proudu I_b při jmenovitých otáčkách rotoru a při spojení statorového vinutí nakrátko. Také v tomto případě se může jednat o závislost I_1 na budícím magnetickém napětí (v případě SS s PM na otáčkách). Pokud není uvažován rozptyl a ohmický odpor vinutí statoru, vytvořené silné reakční pole působí proti poli magnetů. Tím je výsledné pole ve vzduchové mezeře malé, takže chod nakrátko probíhá v nesyčeném stavu, a proto i průběh charakteristiky nakrátko je přímkový. [7]

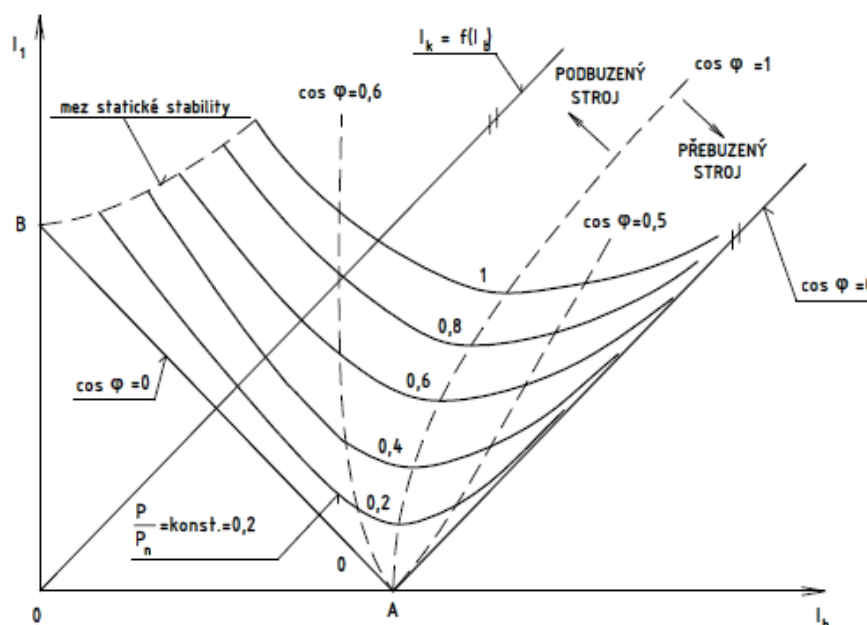
4.5. Paralelní chod generátoru s tvrdou sítí

Jestliže uvažujeme provoz s tvrdou sítí (výkon generátoru je proti síti nepatrný), pak změny činného a jalového výkonu nezpůsobí žádné změny svorkového napětí, nebo tyto změny jsou tak malé, že je zanedbáváme.

Aby napětí U_1 zůstávalo konstantní, je nutné při zvětšování zatížení (proud I_1) v podbuzeném stavu budící proud zmenšovat a v přebuzeném stavu budící proud zvětšovat.

Práce synchronního stroje při napájení sítě se dá posoudit také z tzv. V-křivek. Je to závislost statorového proudu na budícím proudu nebo budícím magnetickém napětí. Závislost $I_1 = f(I_b)$ se vynáší při konstantním výkonu a napětí. Náznovým způsobem se dají V-křivky sestavit pro různé výkony P_1 .

V-křivky pro různé hodnoty proudu a účinníku lze vidět na obr. 4.3. [7]



Obr. 4.3 Ilustrační grafické znázornění V-křivek [7]

4.6. Fázování generátoru se sítí

Jestliže chceme, aby synchronní generátor paralelně spolupracoval se sítí (nebo i pouze s jiným generátorem), musíme zajistit, aby v okamžiku připojení tohoto generátoru k sítí nedošlo k proudovému rázu a také k elektromechanickému vyrovnávacímu pochodu.

Fázování je v podstatě sepnutí dvou nesynchronních dílů sítě, nebo připojení generátoru k sítí, případně k jinému běžícímu generátoru po splnění následujících podmínek [8]:

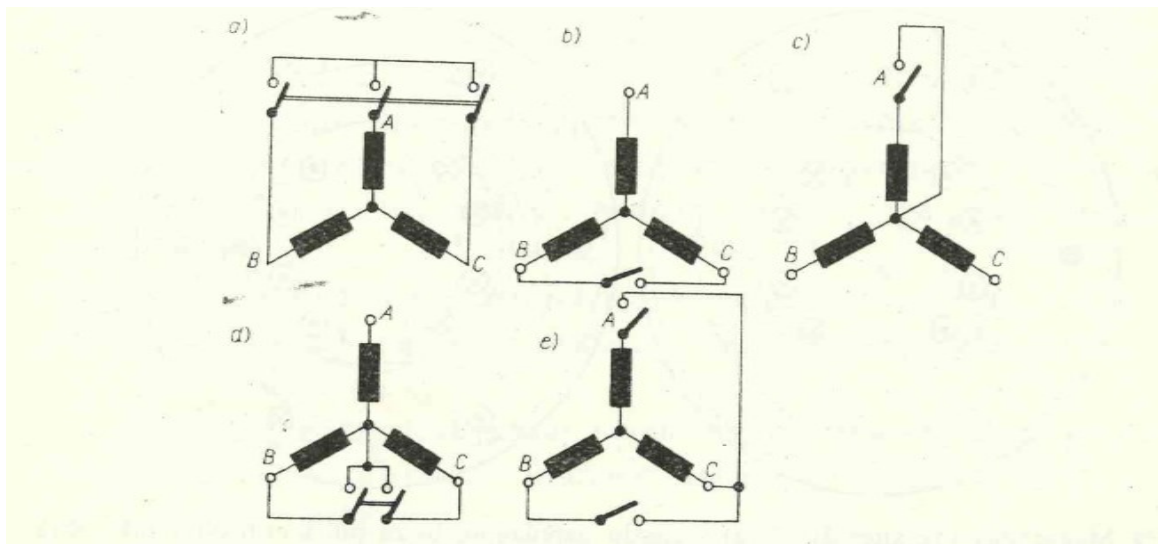
- Sled fází sítě a generátoru musí souhlasit
- Kmitočet a velikost napětí obou soustav musí souhlasit
- Křivky napětí obou soustav mají souhlasit
- Je nutno dosáhnout minimálního fázového posunu mezi napětím generátoru a sítě u stejnojmenných fází

4.7. Náhlé zkraty na synchronním generátoru

Každý synchronní stroj musí být navržen a konstruován tak, aby snesl přímý zkrat na svých svorkách. Pevnost vinutí a celé konstrukce musí být proto taková, aby bez jakékoliv deformace snesla náhlý zkrat ze stavu naprázdno při jmenovitém napětí a jmenovité rychlosti, protože zkratové proudy několikanásobně převyšují jmenovité proudy synchronního generátoru. Náhlý zkrat pak podle [Bašty] může být:

- Třípólový
- Dvoupólový

- c) Jednopolový
- d) Dvoupólový zemní
- e) Postupný, při němž zkrat přechází do trojpólového (obr. 4.4)



Obr. 4.4 Různé druhy zkratů [8]

Tato zkouška je však velmi náročná na vybavení měřicího stanoviště a provádí se pouze tehdy, pokud ji odběratel vysloveně žádá a výrobce provedení zkoušky potvrdí.

Synchronní stroj se v přechodovém stavu během náhlého zkratu chová jinak, než během ustáleného stavu. V průběhu přechodového děje je reaktance reakce kotvy podstatně zmenšená demagnetizačním účinkem rotorových vinutí (budící vinutí a tlumící vinutí) a proto je protékající proud mnohem větší.

Během přechodného děje působí parametry:

- Přechodná reaktance v podélné ose X_d''
- Podélná reaktance v příčné ose X_q''
- Rázová reaktance v podélné ose X_d'
- Rázová reaktance v příčné ose X_q'

Parametr T_d'' je pak časová konstanta, za kterou se utlumí rázová reaktance X_d'' .

Děj přechodové reaktance X_d' se utlumí za časovou konstantu T_d' .

Časová konstanta, za kterou se utlumí stejnosměrná složka, se značí T_a . [4], [7], [8]. [10]

4.8. Synchronní stroje s permanentními magnety

V současné době, díky nástupu nových magnetických materiálů na bázi sloučenin SmCo a NdFeB (viz kap. 3.3), je stále více klasické budící vinutí nahrazováno PM. Díky nim byly vyvinuty synchronní motory s výkonem řádově stovek kilowattů.

Synchronní stroj s permanentními magnety, označován zkratkou PMSM (z angl. Permanent Magnet Synchronous Machine), je točivý stroj, jehož rotor se otáčí synchronně jako točivé pole statoru.

Stator je běžný, třífázový, stejně jako např. u asynchronního nebo klasického synchronního motoru s vinutým rotorem.

Rotor je tvořen PM (nejčastěji ze vzácných zemin), přičemž tvar magnetické indukce ve vzduchové mezeře, a tedy i indukovaného napětí, je harmonický, sinusový.

Statorové vinutí, které je zapojeno do hvězdy, je napájeno harmonickými proudy, což zabezpečuje rovnoměrný chod motoru bez momentových pulzací. K napájení motoru se používá napěťový střídač.

Pro řízení je nutno co nejpresněji znát informaci o okamžité poloze a rychlosti otáčení. Z tohoto důvodu je motor vybaven resolverem nebo inkrementálním čidlem. [4], [9]

Synchronní stroje s PM můžeme rozdělit na dva základní druhy:

- a) Válcové motory
- b) Diskové motory

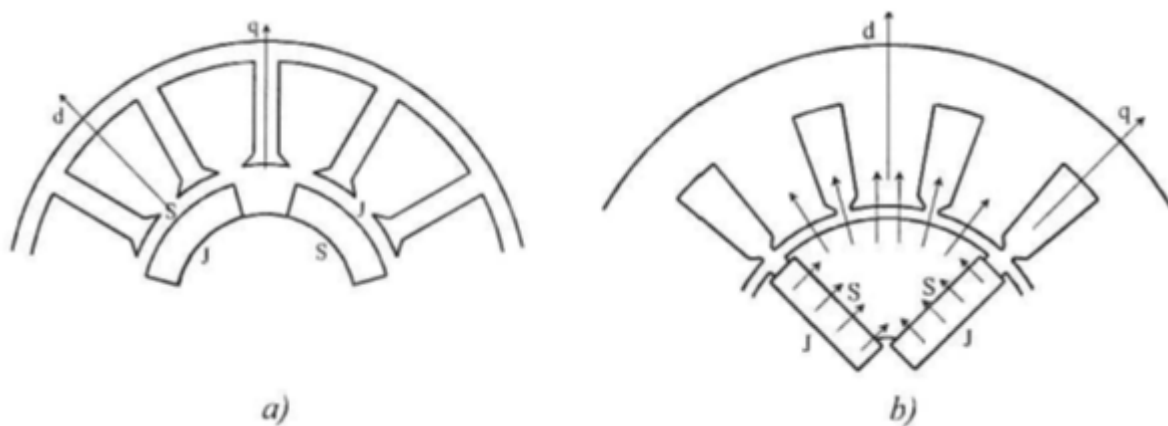
4.8.1. Válcové motory

V synchronních strojích může být klasické buzení stejnosměrným proudem v budícím vinutí nahrazené působením PM. Toto řešení má tu výhodu, že nepotřebuje zdroj buzení, ale zase má tu nevýhodu, že buzení se nedá měnit.

V posledních letech se tyto stroje těší zvláštní pozornosti. Jejich použití je převážně v pohonech s nízko až středovýkonovým rozsahem. Stator synchronního stroje s PM má obvykle trojfázové rozložené vinutí střídavého stroje, rotorové magnetické pole je buzené pomocí PM. Z důvodu, že stroj nemá budící vinutí, nevznikají ani ztráty budícího vinutí, což napomáhá ke zlepšení účinnosti stroje.

Na obr. 4.5 je průřez synchronního stroje s PM, kde uspořádání PM je a) tzv. povrchové (obvodové) a b) tzv. vnitřní (skryté). Stroj s takovýmto uspořádáním je pak na obr.4.6a.

Tyto motory mohou mít klec nakrátko, která by sloužila na rozběh motoru, jako u klasických synchronních strojů.



Obr. 4.5 Uspořádání PM na synchronním stroji
a) Povrchové (obvodové), b) vnitřní (skryté) [4]

Povrchové uspořádání PM je možno považovat za typ s nevyjádřenými póly a protože vzduchová mezera je ve všeobecnosti velká, vliv reakce kotvy na tok pólů je velmi slabý. PM na povrchu rotoru tedy ve vzduchové mezeře představuje materiál v ideálním případě s permeabilitou rovnou μ_0 , ve skutečnosti s permeabilitou $\mu_{rM} = 1,02 \div 1,10$, podle druhu a kvality PM. Z tohoto důvodu je možné celou vzduchovou mezeru, včetně PM, s dostatečnou přesností považovat za homogenní prostor s celkovou permeabilitou μ_0 a tedy tento typ stroje za typ s hladkým rotorem, resp. rotor s nevyjádřenými póly.

V tomto smyslu se analyzují i jeho vlastnosti tj. reaktance v podélné a příčné větvi jsou stejné, tedy $X_d = X_q$. Pokud přece jen chceme odlišit X_d v směru osy d, kde je PM s permeabilitou μ_{rM} od X_q v směru osy q, kde je vzduchová mezera s permeabilitou μ_0 , tak poměr X_d / X_q bude nabývat hodnoty μ_{rM} v závislosti na druhu a kvalitě materiálu PM, a tedy $X_d > X_q$. Vztah pro elektromagnetický moment motoru i jeho grafické vyjádření bude totožné s teorií synchronního stroje s vyjádřenými póly s klasickým budícím vinutím, a to:

$$M_e = 3 \frac{1}{\omega_s} \cdot \left(\frac{U_s U_{ib}}{X_d} \sin \vartheta + U_s^2 \frac{X_d - X_q}{2X_d X_q} \sin 2\vartheta \right) \quad (4.2)$$

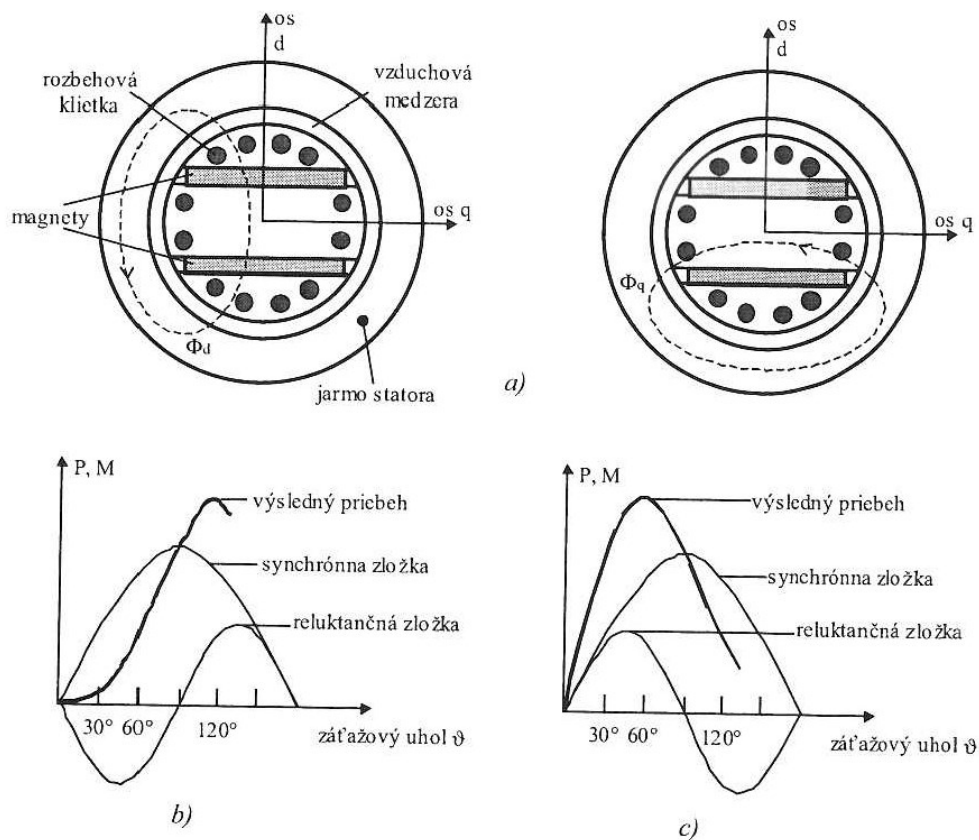
kde ω_s synchronní rychlost
 U_s svorkové napětí
 U_{ib} napětí indukované buzením
 ϑ zátěžný úhel

Závislost M_e na zátěžném úhlu tohoto typu stroje je na obr. 4.6c.

Uspořádání rotoru s vnitřními PM (obr. 4.5b a obr 4.6a, b) se považuje za typ s vyjádřenými póly a proto je celkový moment součtem synchronního (budícího) momentu a reluktančního momentu, jak je zřejmé ze vztahu (4.2).

Na rozdíl od uspořádání s povrchovými PM je však $X_q > X_d$, a proto druhá složka vztahu (4.2) je záporná, a tedy její druhá harmonická začíná v protifázi s první harmonickou

složky momentu. Proto jejich součet nabývá svého maxima za $\pi/2$ (obr. 4.6b), což je výrazná změna oproti typu stroje s $X_d > X_q$, kde maximum výsledného momentu dosahuje při zátěžném úhlu $\vartheta < \pi/2$ (obr. 4.6c).



Obr. 4.6 Synchronní stroj s PM:

a) Rotor s vnitřně uloženými PM, b) $M = f(\vartheta)$ pro $X_d < X_q$, c) $M = f(\vartheta)$ pro $X_d > X_q$ [4]

Důvod, proč toto uspořádání PM dává $X_q > X_d$ vysvětlíme na základě obr. 4.6a:

Z obrázku lze vidět, že pokud vlna magnetického napětí reakce kotvy je svojí amplitudou přesně v ose d (obrázek 4.6a vlevo), magnetická siločára v rotoru musí v ose d dvakrát překonávat cestu přes materiál PM s jeho nízkou hodnotou $\mu_{rM} \cong \mu_0$, tedy přibližně jako přes vzduchovou mezeru. Jestliže se vlna magnetického napětí reakce kotvy posune svojí amplitudou přesně do osy q (obrázek 4.6a vpravo), magnetická siločára v rotoru v ose q se uzavírá pouze magneticky měkkým železným materiálem, tzn. s velkou magnetickou vodivostí, a tedy mnohem větší permeabilitou než μ_0 , neboť $\mu_{rFe} \gg \mu_0$. Proto $X_q > X_d$. Tomu odpovídá charakteristika momentu (výkonu) v závislosti na zátěžném úhlu, která je zobrazena na obr. 4.6b.

Na obr. 4.6c je ta samá charakteristika pro případ $X_d > X_q$, tj. pro uspořádání rotoru s povrchovými PM, resp. klasické synchronní stroje s budícími cívkami na vyjádřených pólech.

Synchronní motory s PM se vyrábí ve výkonech od několika set wattů (zvláště diskové SM) až do několika desítek kW. Přestože mají účinnost vyšší, než motory s budícími cívkami stejného výkonu, magnetická indukce je mnohem nižší, pokud se do těchto strojů použijí ferity.

Ze vztahu pro vnitřní výkon:

$$P_i = k_1 B_\delta A d^2 l_{Fe} n \quad (4.3)$$

kde	B_δ	indukce ve vzduchové mezeře
	A	měrné proudové zatížení povrchu kotvy
	d	průměr kotvy
	l_{Fe}	délka kotvy
	n	rychlost otáčení

vidíme, že snížení B_δ se pro stejný výkon dá vykompenzovat zvětšením objemu kotvy, úměrnému $d^2 l_{Fe}$. Toto se obvykle řeší prodloužením kotvy, např. feritové magnety by vyžadovaly o 50 % delší kotvu v porovnání s magnety ze vzácných zemin.

Zlepšení účinnosti je z tohoto důvodu zaplacené zvětšením hmotnosti, objemu a ceny. Je však možné pracovat s účínkem bližším jedné než u indukčních motorů stejného výkonu, takže snížení požadované hodnoty jalového výkonu vede na snížení cen měniče. Pokud však buzení pomocí PM je navrženo tak, že stroj pracuje s účínkem $\cos \varphi = 1$ při plné zátěži, pak při odlehčení je z něj silný kapacitní účíník, způsobující špatnou účinnost. Obvyklou aplikací pro tento typ motoru jsou pohony v textilním průmyslu, které sice vyžadují možnost změny rychlosti, ale vždy v synchronismu. [4]

4.8.2. Diskové motory

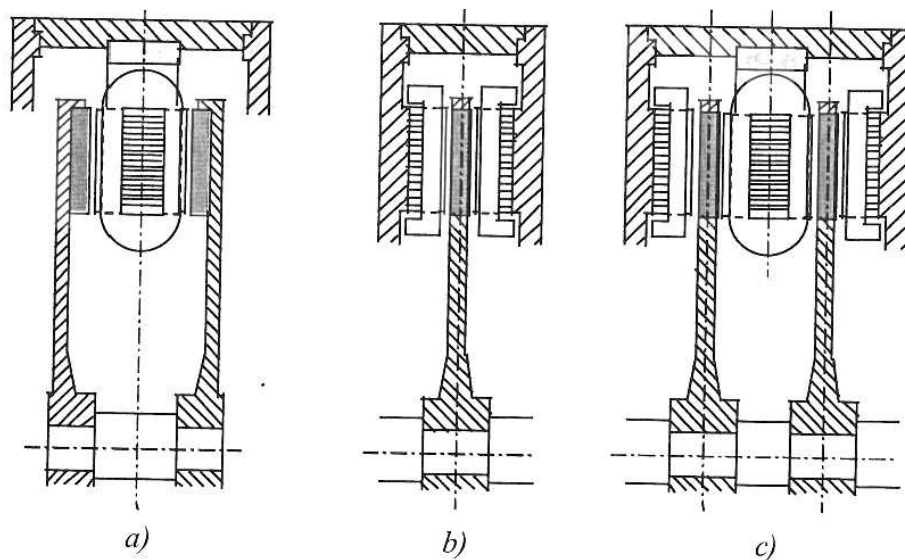
Synchronní diskové motory se konstruují proto, aby využili krátkou axiální osu těchto motorů a tedy malý moment setrvačnosti v souvislosti s rychlými odezvami na řídicí impulzy. V synchronních strojích neexistuje omezení rozsahu otáček, zejména z důvodu dovolené rychlosti kartáčů, jako je tomu například u stejnosměrných strojů. Naopak, PM představují z mechanického hlediska takové těleso, které pokud se zabezpečí proti odstředivým silám na vnějším obvodu disku, mohou se používat pro velmi vysoké rychlosti.

Z hlediska konstrukce je možno uvést tři základní typy těchto strojů (obr. 4.7a, b, c):

- Uspořádání se statorem uprostřed, aktivním z obou stran
- Uspořádání s rotorem uprostřed, aktivním z obou stran
- Uspořádání dvojdiskové se statorem uprostřed a na okrajích,

přičemž ve všech třech typech jsou aktivní plochy uspořádány v radiálním směru a buď stator, rotor, případně oba dva členy jsou aktivní z obou stran.

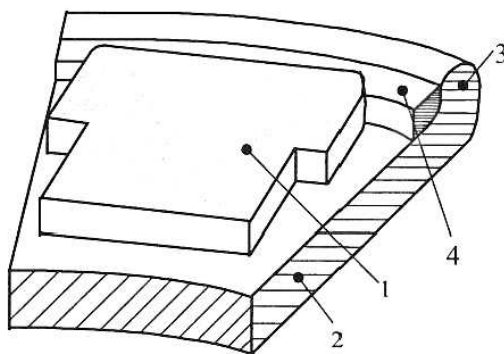
Uspořádání se statorem uprostřed (obr. 4.7a) má z obou stran rotační disky s PM. Protože disky slouží zároveň na uzavření magnetického toku, musí být z magneticky měkkého materiálu. Uložení PM 1 na rotorovém disku 2 je na obr. 4.8. Vidíme výčnělek materiálu disku 3, který chrání PM před odstředivými silami a zároveň hliníkovou distanční podložku 4 mezi PM a tímto výčnělkem, aby nedošlo ke zkratu PM.



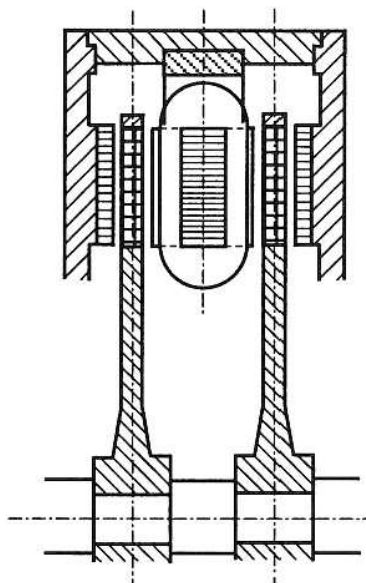
Obr. 4.7 Konstrukční uspořádání diskových synchronních motorů:
a) Se statorem uprostřed, b) S rotorem uprostřed, c) Dvojdiskové uspořádání

Uspořádání 4.7b, c si vyžadují diskové rotory z nemagnetického materiálu, např. hliníku nebo skleněných vláken. Tento materiál má tu výhodu, že se chová elektricky i magneticky neutrálně. Odstředivé síly jsou zachyceny tuhou a lehkou bandáží z uhlíkového vlákna. PM se na kotouče připevňuje lepením. Toto spojení je dostatečně stabilní a vykazuje dobré vlastnosti i při vysokých rychlostech.

Obměnou obr. 4.7a je obr. 4.9. Změnou je to, že na obr. 4.7a se magnetický tok uzavírá přes rotující disky, na obr. 4.9 se uzavírá přes statickou část stroje (oboustranné járma statoru).



Obr. 4.8. Uložení magnetu na disku [4]



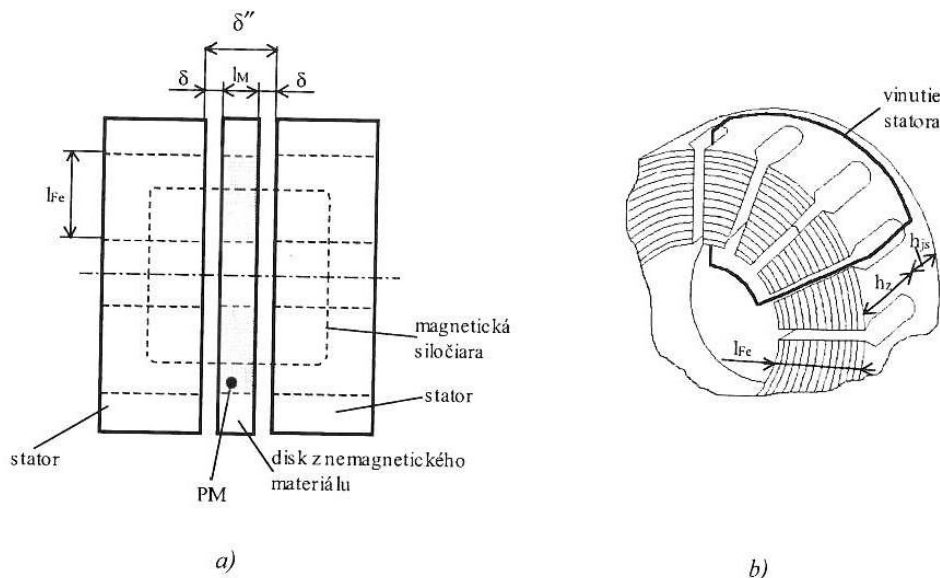
Obr. 4.9. Diskový motor se statorem uprostřed.
Uzavření magnetického toku přes statickou část. [4]

Tvar magnetu diskových motorů je velmi důležitý z hlediska výrobních možností i z hlediska vlastností stroje. Jestliže má zůstat koeficient pólového krytí s rostoucím poloměrem konstantní, PM by měl klínový, resp. lichoběžníkový nebo dvojstupňový tvar (obr. 4.8), jehož šířka se úměrně s poloměrem mění. Pro výrobu je však výhodnější a cenově méně náročný pravoúhlý tvar. Potom se počítá tzv. střední koeficient pólového krytí, který bývá ohraničený hodnotou 0,8. Při návrhu takového stroje v podstatě platí, že na dosažení určité amplitudy magnetické indukce se má použít raději magnet širší než vyšší. Výška magnetu určuje reaktanci a tím i vlastnosti stroje. Pomocí vyššího magnetu se navrhují stroje s menší magnetizační reaktancí a vyšším maximálním momentem (viz (4.2)). Výška magnetu, resp. hloubka disku totiž určuje vzduchovou mezeru. Je třeba si uvědomit, že PM má permeabilitu blízkou hodnotě μ_0 , takže PM spolu s celým nemagnetickým diskem tvoří pro magnetický tok nevodivý prostor, který je potřeba překovat spolu se skutečnými vzduchovými mezerami mezi diskem a statorem, potažmo statorem a disky. Na obr. 4.10 je schématický náčrt stroje s dvěma statory a diskem uprostřed. Efektivní vzduchová mezera určená vlastností PM, že jeho $\mu_{\text{rM}} \cong \mu_0$ a k_c je Carterův činitel, je:

$$\delta'' = 2\delta' + l_M \quad (4.4)$$

kde $\delta' = \delta k_c$
 δ skutečná vzduchová mezera

Na obr. 4.10 je čárkovanou čarou nakreslená cesta magnetické siločáry uzavírající se od jednoho satoru přes dvě vzduchové mezery a disk k druhému satoru a zpět.



Obr. 4.10 a) Náčrt uspořádání diskového motoru se dvěma statory a diskem uprostřed
b) Pohled na vnitřní čelní plochu statoru [4]

Protože se diskové motory používají na vysoké rychlosti, se zvyšující se frekvencí se kladou vyšší požadavky na plechy statoru, aby se potlačily ztráty vířivými proudy. S ohledem na směr toku a způsob uzavírání magnetické siločáry (obr. 4.10a) tvoří magnetický obvod statoru toroidně svinuté průběžně drážkované plechy. Tak se po navinutí plechu vytvoří na vnitřní čelní ploše drážky, do kterých se vloží vinutí kotvy (obr. 4.10b). Na obrázku je načrtnutá jedna cívka drážkovým krokem 3, aby bylo vidět, jaké omezení mají rozměry disku a l_{Fe} , vzhledem na vnitřní čelní vinutí.

Už začátkem století byly snahy nahradit skládání z plechů homogenním magneticky měkkým materiálem, vyráběným práškovou metalurgií, s malými ztrátami v železe. Pokrok v oblasti výkonové elektroniky způsobil, že polovodičové měniče poskytují ES napájení se značně vyššími základními frekvencemi, než je frekvence sítě. Přitom se v ES vyžadují dobré vlastnosti železných materiálů při poměrně vysokých hodnotách magnetické indukce a zároveň je vyžadována také dobrá mechanická pevnost těchto materiálů. Hysterezní ztráty homogenních magneticky měkkých materiálů jsou $\sim 5 \div 10 \text{ [W} \cdot \text{kg}^{-1}\text{]}$, tedy mnohem vyšší než u elektroplechů. Neboť však ztráty vířivými proudy rostou s frekvencí kvadraticky a hysterezní ztráty lineárně, celkové ztráty jsou menší než při použití elektroplechů.

Ve frekvenčním rozsahu pod 1 kHz už může pojivo jednotlivých zrn železného prášku stačit na to, aby se železné částice od sebe odizolovali. Vlastnosti jak dobré izolace, tak mechanicky pevných částí, má kupříkladu umělá pryskyřice.

Vývoj všech synchronních strojů s PM pokračuje dále, jak do konstrukčního uspořádání materiálů, tak i jejich vlastností. Mnoho pracovních týmů a odborníků z celého světa pracuje na tom, aby vlastnosti těchto strojů co nejlépe optimalizovali, případně ještě dále zlepšovali [4].

5. MĚŘENÍ NA SYNCHRONNÍM STROJI S PERMANENTNÍM MAGNETEM

Měřený synchronní motor s PM se štítkovými hodnotami zobrazenými v tab. 5.1 je osmipólový stroj se zapojením do Y, trvale spojený se stejnosměrným motorem s cizím buzením (dynamometrem). Pro měření přifázování, V-křivek a náhlých zkratů je navíc motoru připojen snímací osciloskop.

Tab. 5.1 Štítek synchronního stroje s PM

VUES BRNO, a.s.				CE	
CZECH REPUBLIC					
SYNCHRONNÍ	MOT	3 ~		TYP	SM 112 K\L
IP	23	IM	2002	ČÍS	649 931
6	Kw		kVA	S1	
147 Hz	cosφ		kVar	2200	min ⁻¹
SPOJ	Y	449	V	8,4	A
BUZ	PM		V		A
		IZOL	H	59	kg

Na synchronním stroji s PM byla provedena tato měření:

1. Měření naprázdno
2. Měření nakrátko
3. Měření V-křivek
4. Měření přifázování stroje k síti
5. Měření náhlých zkratů,

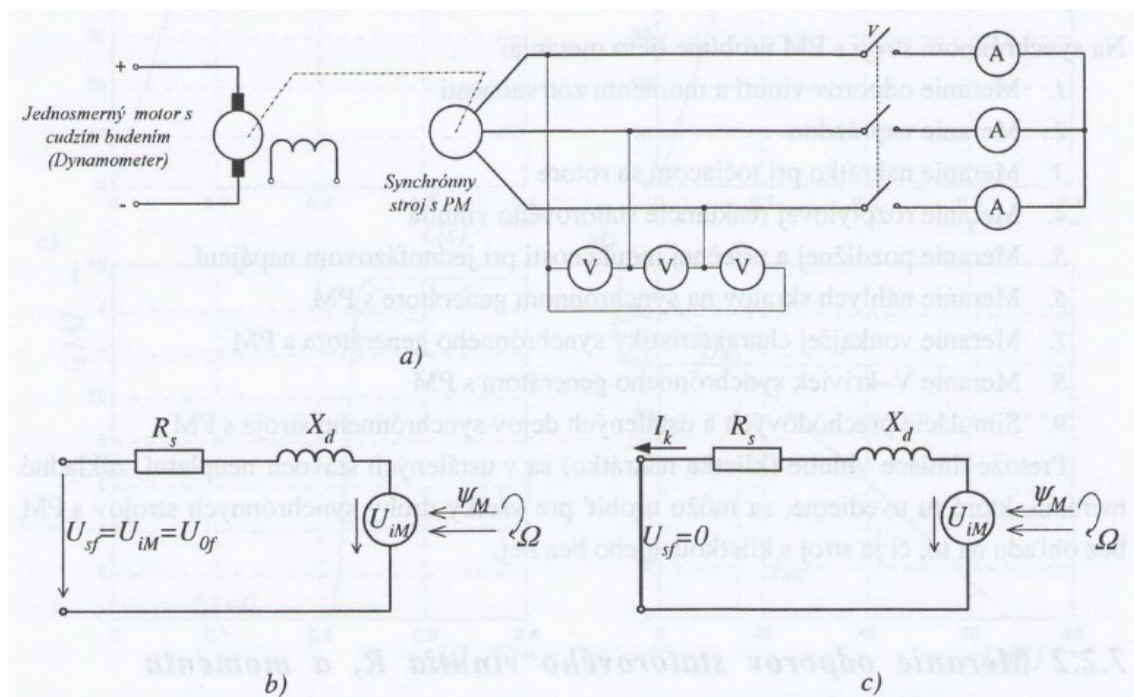
která by měla ověřit teoretický rozbor popsany v kap. 4.3 – 4.7 a ilustrovat způsob měření, vyhodnocení a grafické znázornění průběhu měření na synchronních strojích s PM.

5.1. Měření naprázdno

V synchronních generátorech s budícím vinutím provádíme měření naprázdno tak, že se měří napětí naprázdno jako funkce budícího proudu $U_0 = f(I_b)$, pokud jsou otáčky $n_s = kont.$

V synchronním stroji s PM tuto závislost změřit nelze, neboť v rotoru tohoto stroje není budící vinutí, ale PM, který dává stálý budící magnetický tok. Z toho důvodu měříme závislost napětí naprázdno U_0 v závislosti na otáčkách n , tedy $U_0 = f(n)$. Synchronní stroj je poháněn pohonným motorem, kterým může být například dynamometr. Otáčky se mění z nulových po 1,2 násobek jmenovitých otáček. Synchronní stroj má rozpojené svorky (obr. 5.1, vypínač V je rozepnutý), na kterých měříme pro vyvedený uzel tři fázová napětí ($U_{aof}, U_{bof}, U_{cof}$), nebo tři sdružená napětí, pokud uzel není vyveden (U_{a0}, U_{b0}, U_{c0}), u kterých počítáme střední hodnotu. Závislost indukovaného napětí a otáček by měla být lineární. [10]

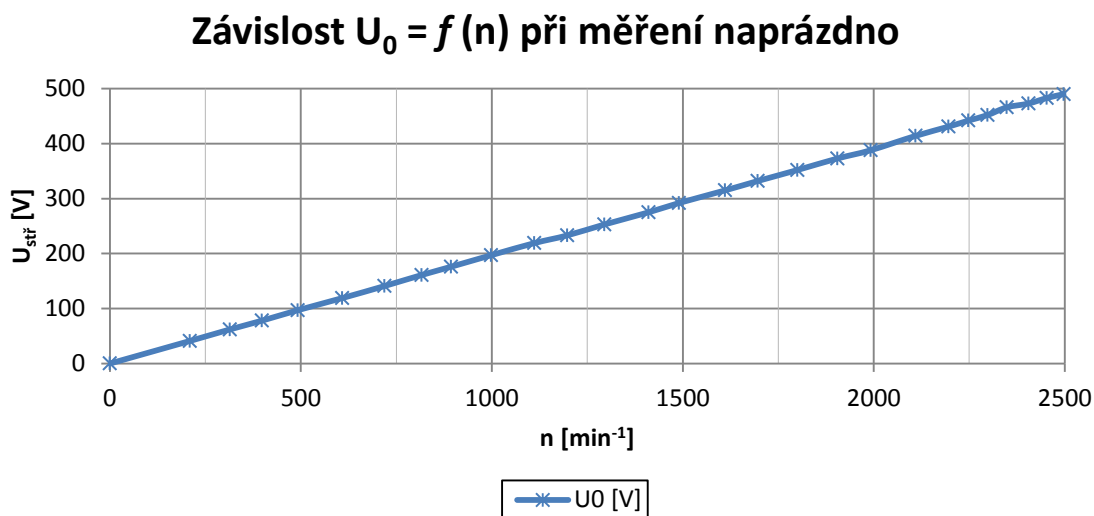
Měření bylo provedeno podle schématu na obr. 5.1a, b.



Obr. 5.1 a) Schéma zapojení pro měření naprázdno a nakrátko,
b) Náhradní schéma pro měření naprázdno, c) Náhradní schéma pro měření nakrátko [10]

Tab. 5.2. Naměřené hodnoty při měření naprázdno

ot.	U_{13}	U_{12}	U_{23}	U_{stf}	ot.	U_{13}	U_{12}	U_{23}	U_{stf}
$[\text{min}^{-1}]$	[V]	[V]	[V]	[V]	$[\text{min}^{-1}]$	[V]	[V]	[V]	[V]
0	0	0	0	0	1490	296	290	290	292
209	41	41	41	41	1611	320	312	313	315
314	62	62	62	62	1696	335	330	331	332
398	78	78	78	78	1800	355	350	351	352
492	97	97	97	97	1905	379	370	370	373
608	119	119	119	119	1992	394	385	385	388
719	141	141	141	141	2109	420	411	411	414
816	161	161	161	161	2196	439	427	427	431
893	176	176	176	176	2248	450	438	438	442
998	197	197	197	197	2298	460	448	448	452
1111	220	218	219	219	2348	470	465	463	466
1197	233	233	233	233	2405	479	470	470	473
1295	255	252	252	253	2453	492	478	479	483
1410	275	275	275	275	2497	500	485	485	490



Obr. 5.2 Průběh indukovaného napětí při měření naprázdno

Graf na obr. 5. 2 zobrazuje průběh napětí U_0 v závislosti na otáčkách pro měření naprázdno. Jak lze vidět, průběh napětí je prakticky lineární, což koresponduje s teorií stroje, uvedenou v kap. 4. 3.

5.2. Měření nakrátko

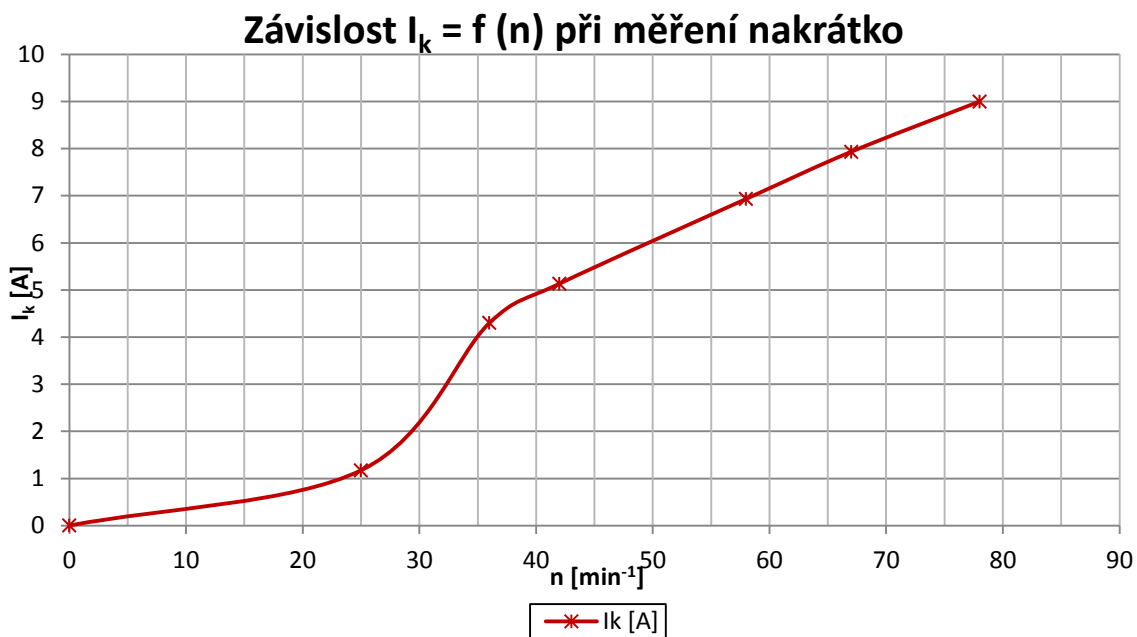
Jak bylo zmíněno v kap. 5.1, v synchronních strojích s PM není budící vinutí, jako v synchronních strojích s buzením, ale PM, který vyzařuje stálý budící magnetický tok.

Proto v těchto strojích neměříme proud I_k v závislosti na proudu $I_k = f(I_b)$, ale podobně jako u měření naprázdno v závislosti na otáčkách n , tedy $I_k = f(n)$. Synchronní stroj je poháněn pohonným motorem, kterým je kupříkladu dynamometr a vypínač V je zapnut (obr. 5.1a). Otáčky měníme od nulových hodnot po jmenovitou hodnotu otáček. Naměřené hodnoty proudu zapíšeme do tabulky, přičemž spočítáme průměrnou hodnotu proudu I_k a vyneseme do grafu v závislosti na otáčkách (obr. 5.3). [10]

Pozn.: Neboť je z teorie známo, že průběh proudu charakteristiky nakrátko by měl být lineární, pro vykreslení charakteristiky bylo naměřeno a následně použito pouze 7 hodnot.

Tab. 5.3 Naměřené hodnoty při měření nakrátko

ot.	I_U	I_V	I_W	$I_{stř}$
$[\text{min}^{-1}]$	$[\text{A}]$	$[\text{A}]$	$[\text{A}]$	$[\text{A}]$
0	0	0	0	0
25	1,52	1	1	1,173333
36	4,5	4,2	4,2	4,3
42	5,4	5	5	5,133333
58	7,2	6,8	6,8	6,933333
67	8,2	7,8	7,8	7,933333
78	9,4	8,8	8,8	9



Obr. 5.3 Průběh proudu při měření nakrátko

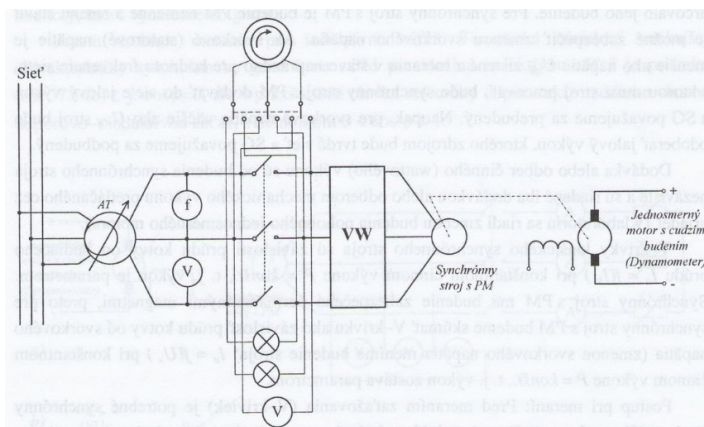
Z grafu 5. 3 je patrné, že průběh proudu I_k není zcela lineární, jak je naznačeno v kap. 4. 4, ale při nízkých otáčkách vidíme nelineární skok na vyšší hodnotu. Přestože je I_k nezávislý na otáčkách, při nízkých otáčkách se začíná uplatňovat hodnota odporu. Pro výpočet tedy nestačí pracovat s reaktancí X_d , nýbrž musíme zohlednit odpor a brát celkovou impedanci Z_d . Toto je důsledek zvlnění průběhu proudu I_k v oblasti nízkých otáček.

5.3. Měření V-křivek

Synchronní stroj, synchronizovaný se sítí, může pracovat jako generátor anebo motor a současně jako zdroj, anebo spotřebič jalového výkonu. Podle toho, zda synchronní stroj dodává anebo odebírá jalový výkon, hovoříme buďto o podbuzeném SS, který odebírá ze sítě jalový výkon a o přebuzeném SS, který naopak do sítě dodává jalový výkon. Pro synchronní stroj s PM je buzení PM neměnné a změnu stavu je možné zabezpečit změnou svorkového napětí. Jestliže je svorkové (statorové) napětí menší než fázové napětí U_{sof} zjištěné z měření ve stavu naprázdno pro hodnotu frekvence sítě $f = 50 \text{ Hz}$, se kterou musí stroj pracovat, bude SS s PM dodávat do sítě jalový výkon a synchronní generátor (SG) považujeme za přebuzený. Naopak, pro svorkové napětí větší než U_{sof} , stroj bude odebírat jalový výkon, kterého zdrojem bude tvrdá síť a SG považujeme za podbuzený. Dodávka anebo odběr činného výkonu jsou nezávislé na buzení SS a jsou řízené pouze dodávkou nebo odběrem mechanického výkonu protlačeného přes hřídel. SS s PM má buzení zabezpečené PM a proto pro tento typ stroje budeme zkoumat V-křivku jako závislost proudu kotvy svorkového napětí (změnou svorkového napětí měníme buzení stroje) $I_a = f(U_s)$ při konstantním činném výkonu $P = \text{konst.}$, tedy výkon zůstává parametrem.

Postup měření:

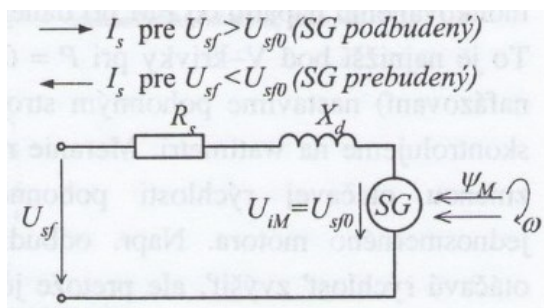
Před měřením zatěžování (V-křivky) je potřebné synchronní stroj přifázovat na síť, tedy splnit podmínky pro připojení SS na tvrdou síť (obr. 5.4). Nafázování se uskuteční při takovém svorkovém napětí, které se rovná indukovanému napětí PM při dané frekvenci (z char. naprázdno, obr. 5.2). To je nejnižší bod V-křivky při $P = 0$ (bod P_0). Po připojení SG na síť (po nafázování) nastavíme pohonným strojem hodnotu požadovaného výkonu, kterého hodnotu zkontrolujeme na wattmetru.



Obr. 5.4 Schéma zapojení pro fázování SG s PM na síť [10]

Měření se provede nejprve pro $P = 0$. Regulaci výkonu provádíme změnu rychlosti otáčení pohonného motoru. Např. odbuzováním stejnosměrného motoru má tento snahu rychlost otáčení zvýšit, ale protože je spojený se SG, kterého rychlost otáčení je dána frekvencí sítě, příslušné množství činné energie se protlačí do sítě. Pokud je zapotřebí množství činného výkonu dodávaného do sítě snížit, stejnosměrný pohonný motor přibudíme.

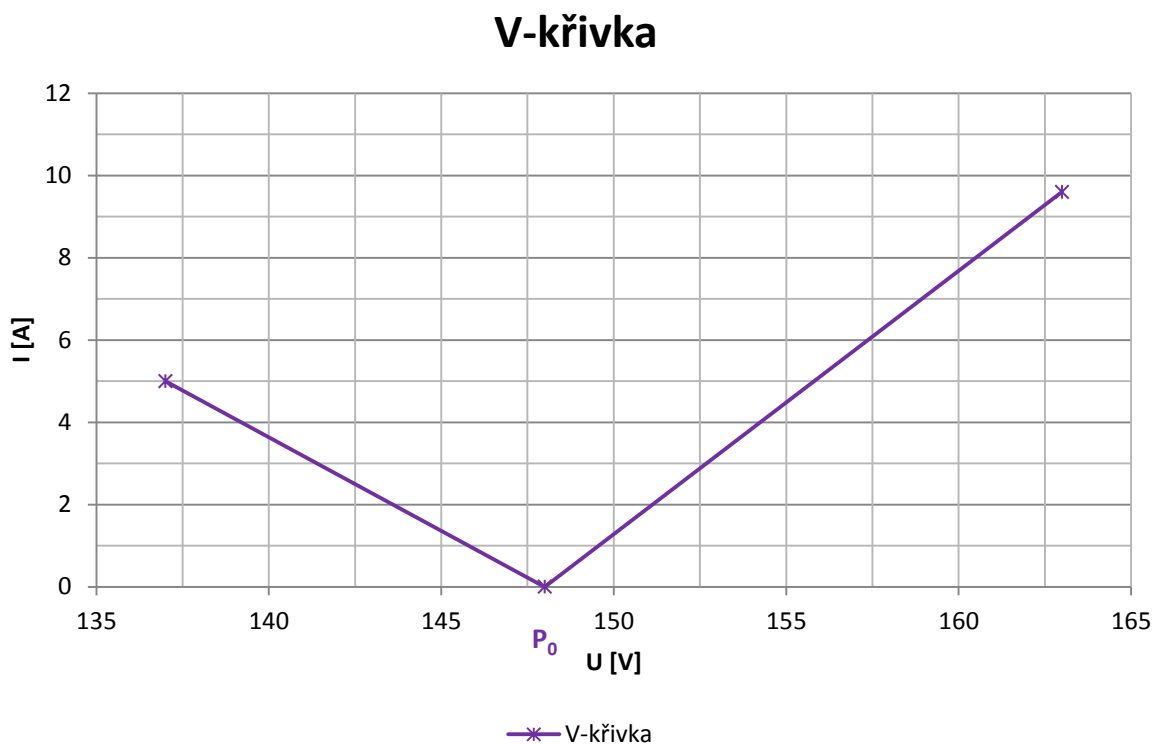
Po nastavení správné hodnoty výkonu a odčítání proudů v kotvě při daném napětí U_s , autotransfornátorem zvyšujeme dále hodnotu statorového napětí SG, a pro každou měřenou hodnotu U_s doregulujeme požadovanou hodnotu výkonu a odečítáme proud v kotvě I_a . Tím měříme pravou větev V-křivky. Poté se zase vrátíme k hodnotě U_{sf0} , při které nastalo náfázování SG a snižujeme hodnotu U_s postupně až k nule, resp. řídíme se hodnotou proudu kotvy SG. V obou případech dbáme na to, aby proud v kotvě nepřekročil 120% jeho jmenovité hodnoty. Při hodnotě $U_{sf} = 0$, V-křivka pro $P = 0$ protne na ose proudu kotvy hodnotu I_{k0} , známou z vyhodnocení měření nakrátko při dané frekvenci. Další V-křivku se pak měří obdobným způsobem, s tím, že nastavíme jinou hodnotu požadovaného výkonu (např. $P = 0,5 P_N$). Na obr. 5.5 je pro názornost náhradní schéma, které ilustruje právě popsané pochody při měření V-křivek. [10]



Obr. 5.5 Náhradní schéma pro měření V-křivek [10]

Tab. 5.4 Tabulka naměřených hodnot při měření V-křivek (pro otáčky 750 min^{-1})

P	I	U
[W]	[A]	[V]
0	5	137
0	0	148
0	9,6	163



Obr. 5.6 Vykreslení V-křivky z naměřených hodnot

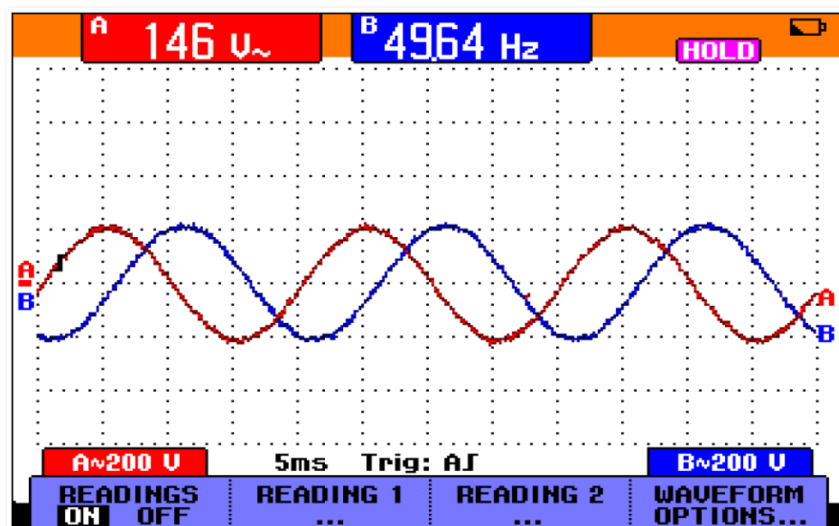
5.4. Měření přifázování

Jak již bylo naznačeno v kap. 4.6, má-li daný alternátor pracovat paralelně se sítí, která má své napětí sítě U_s a kmitočet f , musíme jej přifázovat k síti.

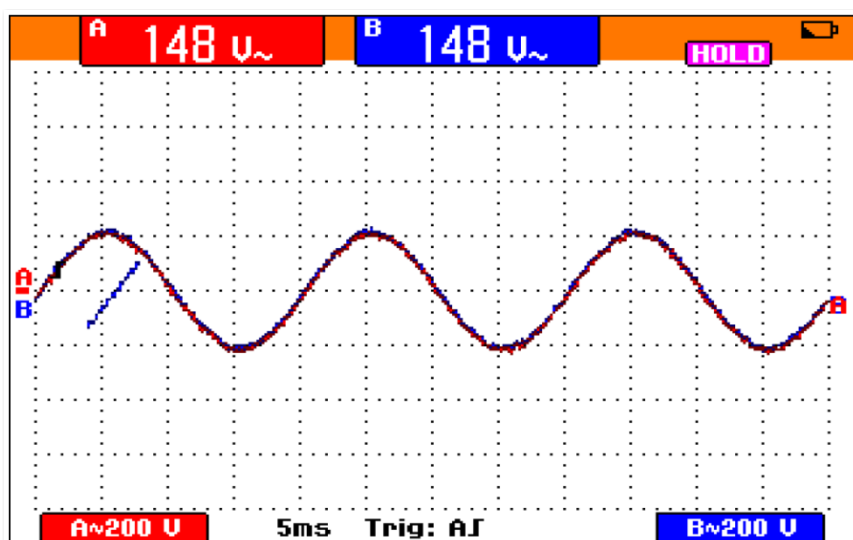
V tomto bodě měření je provedena simulace připojení na síť (přesněji připojení SS s PM k síti) za použití osciloskopu, s jehož pomocí jsou vykresleny grafy, které budou názorně demonstrovat správné přifázování (obr. 5.1, 5.2). Vycházíme z předpokladu, že byly ověřeny všechny náležitosti a podmínky pro toto připojení (viz kap. 4.6).

Měření je provedeno pro sdružené hodnoty, které lze vidět na obrázcích níže, pro kmitočet sítě 50 [Hz] a otáčky $n = 750 \text{ [min}^{-1}\text{]}$.

Pro ideální případ přifázování k síti je třeba vystihnout okamžik, kdy amplituda napětí bude maximální a naopak proud bude procházet nulou. [10]



Obr. 5.7 Záznam osciloskopu při snímání napětí před přifázování SS na síť



Obr. 5.8 Záznam osciloskopu při snímání napětí po přifázování SS na síť

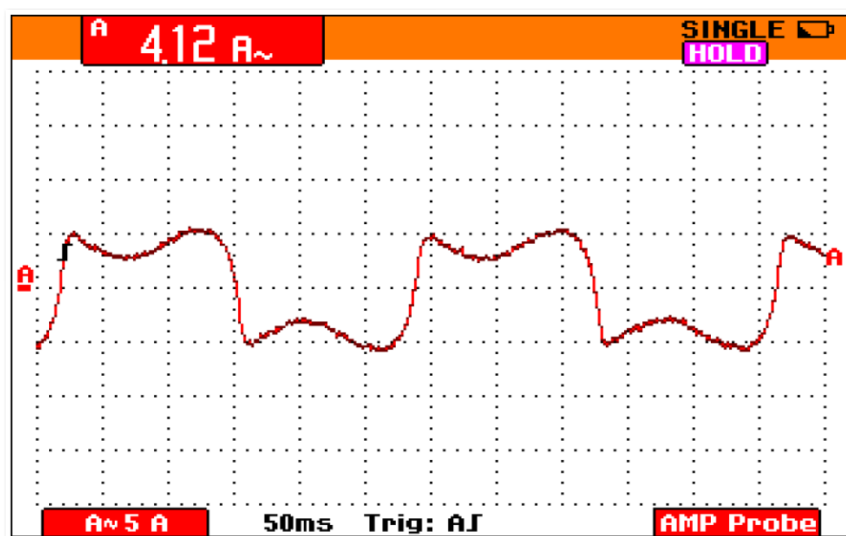
5.5. Měření náhlých zkratů

Měřením náhlých zkratů na synchronním stroji s PM můžeme určit tyto parametry: $X_d'', X_d', X_d, T_d'', T_d', T_a$ (viz kap. 4.7). Synchronní generátor s PM je poháněn pohonným motorem, např. dynamometrem jmenovitými otáčkami tak, aby indukované napětí mělo jmenovitou frekvenci. Ze stavu naprázdno uděláme náhlý zkrat zapnutím vypínače V a vhodným paměťovým osciloskopem zaznamenáme průběhy proudů ve všech fázích. Časovou základnu na osciloskopu nastavíme tak, abychom snímali nejen přechodný děj, ale také ustálený stav. Po zachycení uvedených průběhů osciloskopem vypínač V okamžitě rozepneme, aby nedošlo k demagnetizaci PM. Získané parametry pak můžeme případně dosadit do potřebných

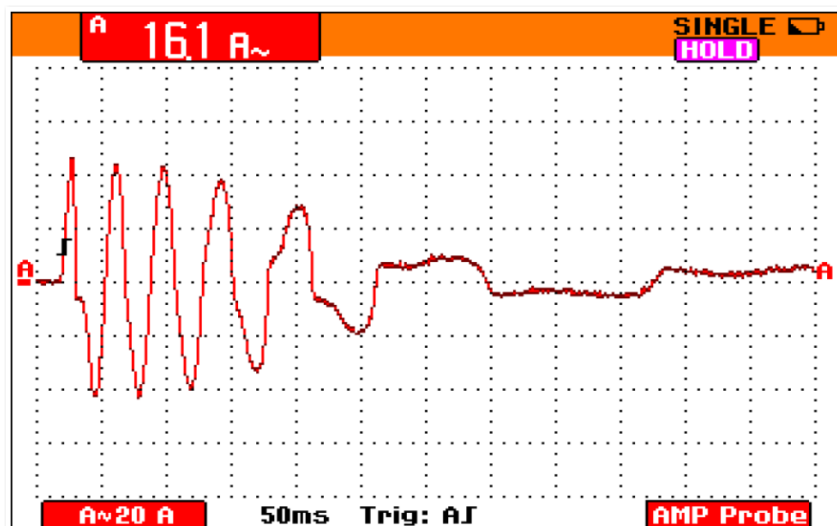
vztahů. Ve vhodném simulačním prostředí průběhy proudů SS s PM během náhlého zkratu vypočteme a vykreslíme. Výsledky porovnáme s naměřenými průběhy, abychom zjistili, zda parametry byly správně určeny. [10]

Tabulka 5.5 Odečtené hodnoty pro průběhy zkratových proudů během měření náhlých zkratů

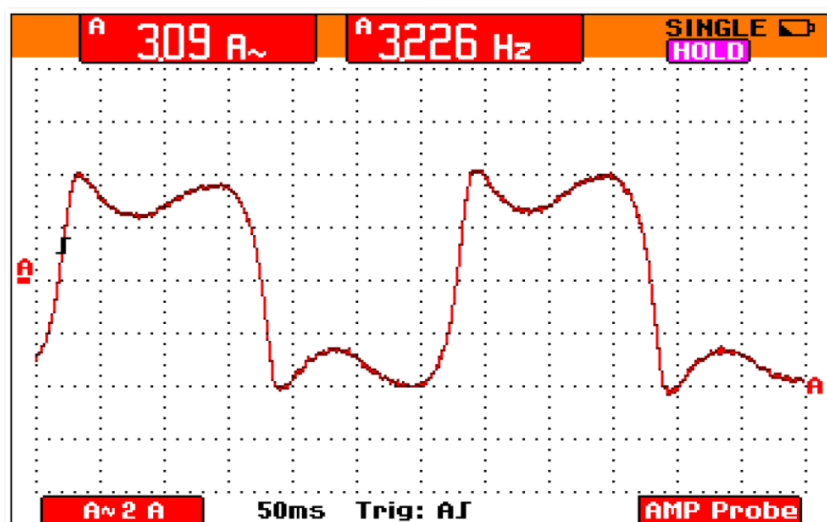
	U	I	ot.
	[V]	[A]	[min ⁻¹]
PŘED	100	4,12	500
PO	0	7	500
	92		50



Obr. 5.9 Záznam osciloskopu před náhlým zkratem (ustálený děj)



Obr. 5.10 Záznam osciloskopu po náhlém zkratu (přechodný děj)



Obr. 5.11 Záznam osciloskopu po náhlém zkratu (ustálený děj)

ZÁVĚR

Hlavním cílem této bakalářské práce bylo provést rozbor a stručný popis vlastností typických pro synchronní stroj s permanentním magnetem v jeho obecné rovině. Neboť je tato problematika nad rámec běžné výuky bakalářského studia, ze zadání bylo podstatným úkolem nastudování jak problematiky týkající se permanentních magnetů a magnetismu vůbec, tak teorie synchronních strojů buzených právě těmito trvalými magnety. Po prostudování odborné literatury a získání teoretických předpokladů jsem mohl tyto nabyté znalosti využít v dalším bodu zadání, což bylo provedení základního měření na synchronním stroji s permanentním magnetem a následné ověření správnosti teoretických předpokladů porovnáním s výsledky mnou provedeným měřením.

Z důvodu předešlé neznalosti této problematiky jsem věnoval velkou pozornost jednotlivým dílčím souvislostem, které jsem se snažil poskládat koncepčně za sebe, a vytvořit tak jednotný a smysluplný celek, který bude řešit problematiku této bakalářské práce. Při řešení jsem postupoval systematicky, aby každý případný čtenář, ať již jakkoliv vzdělaný v otázce PMSM, snadno porozuměl dané problematice. Z tohoto důvodu jsem při psaní práce postupoval tak, aby na sebe jednotlivé kapitoly plynule navazovaly, vzájemně se doplňovaly a postupně tak utvořily logickou strukturu celku, který zároveň koresponduje se zadáním. Tato bakalářská práce se tedy nezabývá konkrétním problémem či strojem, ale povrchně se snaží řešit obecnou teorii synchronního stroje s permanentním magnetem, včetně dalších přidružených parametrů potřebných k celkovému pochopení řešeného problému.

Při studiu teorie k napsání této bakalářské práce jsem povětšinou čerpal z cizojazyčné literatury, neboť jsem nenarazil na dostatek potřebných tuzemských materiálů. Usuzuji proto, že tato bakalářská práce může být jednou z mála prací napsaných v českém jazyce, popisující problematiku synchronního stroje s permanentním magnetem v takovémto rozsahu, v čemž vidím její zásadní přínos.

Snahou bylo, aby tato bakalářská práce i do budoucna mohla být jakýmsi výchozím textem budoucím bakalářům, píšících o problematice PMSM, ze kterého by mohli čerpat základní informace, a případně by jej mohli dále rozšířit, nebo se zaměřit například na návrh konkrétního PMSM. Protože PMSM je poměrně složitý stroj, na jehož vývoji pracují vědci z mnoha oborů, domnívám se, že některé kapitoly tohoto textu by rovněž mohly být přínosem studentům fakult FEI, FS či FMMI VŠB – TUO, ale i jiných škol.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KRUPÍČKA, Svatopluk. *Magnetismus: Historie a současnost*. [online]. c2007-10. Fyzikální ústav AV ČR. Dostupné z: <http://www.learned.cz/userfiles/pdf/prednasky-cleny-odborne/svatopluk.krupicka_0207.pdf>.
- [2] DRÁPALA, Jaromír. KURSA, Miroslav. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2012. 439 s. ISBN 978-80-248-2570-0.
- [3] SINOMAG. Permanentní magnety, co je třeba vědět o magnetech. [online]. c2010, poslední revize 4. 10. 2010. Dostupné z: <http://www.sinomag.cz/sinomag.cz/data/sinomag/downloads/Permanentni_magnety.pdf>.
- [4] HRABOVCOVÁ, Valéria. JANOUŠEK, Ladislav. RAFAJDUS, Pavol. LIČKO Miroslav. *Moderné elektrické stroje*. 1. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině. 2001. 263 s. ISBN 80-7100-809-5.
- [5] MAGNET ENERGY. [online]. Dostupné z: <<http://www.magnetnrg.com/pm-history.html>>.
- [6] MAGNET ENERGY. [online]. Dostupné z: <<http://www.magnetnrg.com/rep-history.html>>.
- [7] CHMELÍK, Karel. *Asynchronní a synchronní elektrické stroje*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2001. 135 s. ISBN 80-7078-857-7.
- [8] BAŠTA, Jan. CHLÁDEK, Jaroslav. MAYER, Imrich. *Teorie elektrických strojů*. 1. vyd. Praha: SNTL. 1968. 584 s. TČ L25-C3-IV-41/5790-VIII.
- [9] NEBORÁK, Ivo. *Elektrické pohony pro kombinované a distanční studium*. 1. vyd. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava. 2008. 139 s. ISBN XX.
- [10] HRABOVCOVÁ, Valéria. RAFAJDUS, Pavol. FRANKO, Marek. HUDÁK, Peter. *Meranie a modelovanie elektrických strojov*. 2. vyd. Žilina: Žilinská univerzita v Žilině. 2009. 335 s. ISBN 978-80-8070-924-2.